

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

**DVOUPÁSMOVÁ WI-FI ANTÉNA
PRO KOMUNIKACI UVNITŘ AUTA**

DUAL-BAND ANTENNA FOR IN-CAR COMMUNICATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondrej Vörös

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Cupal

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Student: Ondrej Vörös

ID: 161919

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Dvoupásmová wi-fi anténa pro komunikaci uvnitř auta

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Na textilním substrátu navrhnete planární anténu vhodnou pro integraci do interiéru automobilu pracující v ISM pásmech 2,4 a 5,8 GHz. Anténa bude uzpůsobena pro spolupráci s komerčně dostupnými WI-FI routery.

Navrženou anténu vyrobte a změřte její parametry ve volném prostoru. Provedte měření úrovně signálu uvnitř automobilu při využití navržených antén a komerčně dostupných antén. Dosažené výsledky vzájemně porovnejte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] A printed 2.4 GHz/5.8 GHz dual-band monopole antenna with a protruding stub in the ground plane for WLAN and RFID (PDF Download Available).


[2] CHANG, T.-N., SHEN, G.-Y., LIN, J.-M. CPW-fed antenna covering WiMAX 2.5/3.5/5.7 GHz bands. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, Vol. 24, Nos. 2-3, 189-197, 2010.

Termín zadání: 6. 2. 2017

Termín odevzdání: 30.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Cupal

Konzultant:


prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá návrhom dvojpásmovej planárnej antény na textilnom substráte pre použitie vo WLAN sieťach v ISM pásmach 2,4 a 5,8 GHz vnútri automobilu. V teoretickej časti sú stručne opísané základné poznatky o vlastnostiach a typoch planárnych mikropásikových antén, spôsoboch napájania a metódach analýzy. V praktickej časti je uvedený návrh dvojpásmovej antény v programe CST Microwave Studio. Dva koncepty dvojpásmových antén navrhnuté na substráte FR4 sú transformované na 3D textil a vyladené na požadované frekvencie. Práca popisuje výrobu a meranie navrhnutých dvojpásmových antén v bezodrazovej komore a tiež vnútri auta.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

dvojpásmová anténa, planárna anténa, textilný substrát, ISM pásmo, WLAN

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the design of dual-band planar antenna on a textile substrate. The proposed antenna is tuned to the ISM band 2,4 and 5,8 GHz for application in WLAN-in-car communication. The most common types of planar microstrip antennas, their parameters, feeding methods and methods of analysis are introduced in the first part of this work. In the practical section, the design of the dual-band antenna is presented with the use of the program CST Microwave Studio. The design of two concepts of dual-band antenna made on the FR4 substrate is transformed on the 3D textile and optimised to work at desired frequency bands. After then, the thesis describes fabrication and measurement of designed dual-band antennas in the anechoic chamber and in the car.

KEYWORDS

dual-band antenna, planar antenna, textile substrate, ISM band, WLAN

VÖRÖS, O. *Dvoupásmová Wi-Fi anténa pro komunikaci uvnitř auta*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017. 31 s., 4 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Miroslav Cupal

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému Dvoj pásomvá Wi-Fi anténa pre komunikáciu vnútri auta som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich zákona č. 121/2000 Sb., o autorskom práve, o právach súvisiacich s autorským právom a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávnych dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa

.....

(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Miroslavovi Cupalovi za účinnú metodickú a odbornú pomoc pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

OBSAH

Zoznam obrázkov	vii
Zoznam tabuliek	ix
Úvod	1
1 Mikropásikové antény	2
1.1 Úvod.....	2
1.2 Metódy analýzy mikropásikových antén	2
1.3 Typy mikropásikových antén.....	2
1.4 Napájanie mikropásikových antén	4
1.5 Parametre mikropásikových antén	6
1.6 Vplyv dielektrického substrátu na parametre mikropásikovej antény	8
2 Návrh dvojpásmovej antény	10
2.1 Popis vybraných vhodných konceptov dvojpásmových antén	10
2.2 Transformácia antén na textilný substrát	14
2.3 Modelovanie antén a analýza v programe CST Microwave Studio	16
2.4 Výsledky modelovania	18
3 Výroba a meranie dvojpásmových antén	22
3.1 Výroba antén.....	22
3.2 Meranie impedančného prispôsobenia.....	22
3.3 Meranie smerových charakteristík.....	23
3.4 Meranie úrovne signálu antén vnútri auta.....	27
4 Záver	31
Literatúra	32
Zoznam symbolov, veličín, skratiek	33
A Simulované smerové charakteristiky	34
B Fotografia vyrobených antén	36
C Impedančné prispôsobenie referenčných antén použitých k meraniu v aute	37

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1.1 Základné tvary mikropásikových antén.	3
Obrázok 1.2 Pravouhlý mikropásikový fliačik.	3
Obrázok 1.3 Planárna monopólová anténa budená pomocou mikropásika.	4
Obrázok 1.4 Vybrané typy mikropásikových vedení: a) nesymetrické mikropásikové vedenie, b) zemnený koplánarný vlnovod.	5
Obrázok 1.5 Napájanie mikropásikovým vedením: (a) na okraji fliačika; (b) vnorené napájanie.	5
Obrázok 1.6 Vplyv hrúbky dielektrického substrátu na šírku pásma mikropásikovej antény pre rôzne hodnoty relatívnej permitivity substrátu, [1].	9
Obrázok 1.7 Vplyv hrúbky dielektrického substrátu na straty vplyvom šírenia povrchovej vlny pre rôzne hodnoty relatívnej permitivity substrátu, [1].	9
Obrázok 2.1 Geometria dvojpásmovej monopólovej antény, [7].	10
Obrázok 2.2 Graf činiteľa odrazu a) a meraného zisku b) dvojpásmovej monopólovej antény, [7].	11
Obrázok 2.3 Merané smerové charakteristiky vyžarovania dvojpásmovej monopólovej antény v rovine E na (a) 2,4 GHz a (b) 5,8 GHz, [7].	11
Obrázok 2.4 Merané smerové charakteristiky vyžarovania dvojpásmovej monopólovej antény v rovine H na (a) 2,4 GHz a (b) 5,8 GHz, [7].	12
Obrázok 2.5 Geometria dvojpásmovej štrbinovej antény, [8].	12
Obrázok 2.6 Graf činiteľa odrazu a) a meraného zisku b) dvojpásmovej štrbinovej antény, [8]. a) ●: simulácia; ∇: meranie. b) ● s vonkajším prstencom; ▼: s priamo pripojeným prstencom; ○: bez prstenca.	13
Obrázok 2.7 Smerové charakteristiky vyžarovania dvojpásmovej štrbinovej antény v rovine H na a) 2,5 GHz a b) 5,7 GHz (plná čiara- anténa s vonkajším prstencom, prerušovaná čiara- anténa bez prstenca), [8].	13
Obrázok 2.8 Štruktúra monopólovej antény s rozmermi podľa tabuľky 2.2.	15
Obrázok 2.9 Model monopólovej a štrbinovej antény s pripojeným SMA konektorom, vytvorený v programe CST MWS.	17
Obrázok 2.10 Simulovaný činiteľ odrazu monopólovej antény na FR4 podľa návrhu zo [7].	19
Obrázok 2.11 Simulovaný činiteľ odrazu monopólovej antény na 3D textile.	20
Obrázok 2.12 Simulovaný činiteľ odrazu štrbinovej antény na FR4 podľa návrhu z [8] (anténa je bez prstenca).	21
Obrázok 2.13 Simulovaný činiteľ odrazu štrbinovej antény na 3D textile (anténa je bez prstenca).	21

Obrázok 3.1 Impedančné prispôsobenie monopólovej antény.	22
Obrázok 3.2 Impedančné prispôsobenie štrbinovej antény.	23
Obrázok 3.3 Usporiadanie meracieho pracoviska pre meranie smerových charakteristík antén, prevzaté z [11].	24
Obrázok 3.4 Meraný zisk monopólovej antény v rovine E na frekvencii 2,45 GHz.	25
Obrázok 3.5 Meraný zisk monopólovej antény v rovine H na frekvencii 2,45 GHz.	25
Obrázok 3.6 Meraný zisk monopólovej antény v rovine E na frekvencii 5,8 GHz.	25
Obrázok 3.7 Meraný zisk monopólovej antény v rovine H na frekvencii 5,8 GHz.	26
Obrázok 3.8 Meraný zisk štrbinovej antény v rovine E na frekvencii 2,45 GHz.	26
Obrázok 3.9 Meraný zisk štrbinovej antény v rovine H na frekvencii 2,45 GHz.	26
Obrázok 3.10 Meraný zisk štrbinovej antény v rovine E na frekvencii 5,8 GHz.	26
Obrázok 3.11 Meraný zisk štrbinovej antény v rovine H na frekvencii 5,8 GHz.	27
Obrázok 3.12 Výkonový prenos medzi anténami vnútri auta na vyznačenom pásme ISM 2,4 GHz pri umiestnení meraných antén na predné sedadlo.	28
Obrázok 3.13 Výkonový prenos medzi anténami vnútri auta na vyznačenom pásme ISM 2,4 GHz pri umiestnení meraných antén na zadné sedadlo.	28
Obrázok 3.14 Výkonový prenos medzi anténami vnútri auta na vyznačenom pásme ISM 5,8 GHz pri umiestnení meraných antén na predné sedadlo.	28
Obrázok 3.15 Výkonový prenos medzi anténami vnútri auta na vyznačenom pásme ISM 5,8 GHz pri umiestnení meraných antén na zadné sedadlo.	29
Obrázok 3.16 Impedančné prispôsobenie monopólovej antény počas jednotlivých meraní v aute.	29
Obrázok 3.17 Impedančné prispôsobenie štrbinovej antény počas jednotlivých meraní v aute.	29

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 2.1 Rozmery dvojpásmovej štrbinovej antény s koplanárnym vlnovodom.	12
Tabuľka 2.2 Počiatočné rozmery návrhu monopólovej antény na 3D textile.	15
Tabuľka 2.3 Počiatočné rozmery návrhu štrbinovej antény na 3D textile.	16
Tabuľka 2.4 Porovnanie rozmerov a rezonančných dĺžok pred a po optimalizácii modelu monopólovej antény.	19
Tabuľka 2.5 Porovnanie rozmerov pred a po optimalizácii modelu štrbinovej antény. .	20
Tabuľka 3.1 Zmerané a simulované hodnoty maximálneho realizovaného zisku a simulovaná účinnosť antén.	24
Tabuľka 3.2 Legenda k označovaniu priebehov v grafoch na obr. 3.12 až 3.17.	27

ÚVOD

Pripojenie na internet pomocou bezdrôtových lokálnych sietí WLAN (bežne nazývané „Wi-Fi“) sa stáva pomaly už bežnou záležitosťou v domácnostiach, obchodoch, v hromadnej doprave či dokonca na námestiach miest. Tieto siete využívajú „bezlicenčné“ frekvenčné pásma ISM (Industrial, Scientific and Medical) určené pre priemyslové, vedecké a lekárske účely, ktoré sú voľne využiteľné pod podmienkou malého vysielacieho výkonu zariadenia. V husto osídlených oblastiach býva najnižšie ISM pásmo 2,4 GHz často úplne využívané, preto nastáva posun k využívaniu vyšších pásiem. S výhodou možno vysielat' na viacerých pásmach súčasne (a zvýšiť tak rýchlosť komunikácie) použitím viacpásmových antén.

Táto práca sa zaoberá návrhom planárnej dvojpásmovej antény pre siete Wi-Fi k vysielaniu v pásmach ISM 2,4 GHz (2,4 - 2,5 GHz) a 5,8 GHz (5,725 - 5,875 GHz). Pre anténu má byť použitý (ako dielektrikum) textilný substrát a anténa má byť prispôbena k použitiu s bežnými, komerčne dostupnými Wi-Fi smerovačmi.

Čo sa týka postupu práce, najskôr je potrebné zvoliť vhodnú štruktúru antény a tento model ďalej optimalizovať s ohľadom na použitie zvoleného textilného substrátu. K modelovaniu antény bude použitý program CST Microwave Studio. Na základe získaných výsledkov zo simulácií sa vyrobí prototyp antény a zmerajú sa jeho parametre, smerová vyžarovacia charakteristika v bezodrazovej komore. Na záver sa uskutoční meranie úrovne signálu vnútri automobilu pri použití navrhnutej antény a inej, najlepšie komerčne dostupnej antény.

Výsledkom práce by mala byť dvojpásmová anténa s výstupom v podobe jedného SMA konektoru.

Práca je rozdelená na tri časti. V úvodnej kapitole je predložený stručný základný prehľad teórie o planárnych mikropásmových anténach, o vybraných typoch a spôsoboch napájania týchto antén. Kapitola 2 opisuje návrh planárnej dvojpásmovej antény na textilnom substráte a jej modelovanie v elektromagnetickom simulátore. Kapitola 3 sa zaoberá výrobou funkčného prototypu navrhnutej antény a experimentálnym meraním jej parametrov.

1 MIKROPÁSIKOVÉ ANTÉNY

1.1 Úvod

V poslednej dobe, kvôli čoraz častejšiemu využívaniu rôznych bezdrôtových komunikácií (GSM, UMTS, WLAN, radary, satelity, atď.) pracujúcich v pásme decimetrových až milimetrových vln sa planárne mikropásikové antény stali veľmi rozšíreným druhom antén. K rozsiahlemu použitiu ich predurčujú výhodné vlastnosti: malé rozmery, nízka hmotnosť a vďaka technológii výroby zhodnej s výrobou plošných spojov tiež dobrá reprodukovateľnosť a nízka cena. Nevýhodou týchto antén je úzke pracovné pásmo, nízka účinnosť a malá výkonová zaťažiteľnosť (väčšie výkonové zaťaženie možno dosiahnuť použitím anténnych polí). Tiež môžu nastať problémy s napájaním antény, parazitné vyžarovanie napájacieho mikropásikového vedenia či holého živého vodiča koaxiálneho vedenia môže deformovať smerovú charakteristiku antény [1].

1.2 Metódy analýzy mikropásikových antén

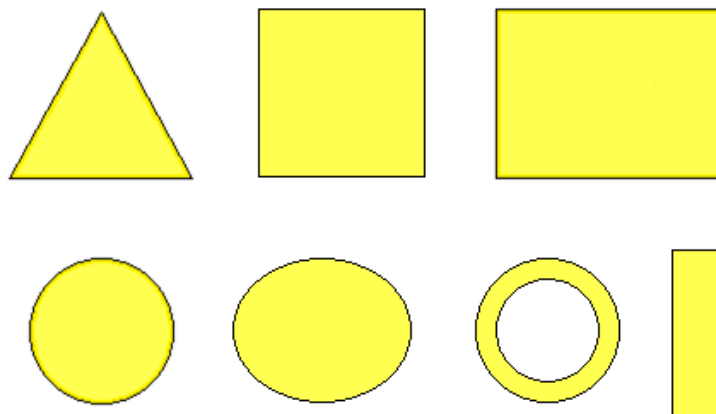
V súčasnosti existuje mnoho rozdielnych metód k popísaniu vlastností mikropásikových antén. Možno ich rozdeliť na aproximačné a na vlnové metódy.

Aproximačné metódy- model prenosového vedenia a model dutinového rezonátora použitím zjednodušujúcich predpokladov znižujú komplexnosť analýzy. Za určitých podmienok možno pomocou týchto metód dosiahnuť aj relatívne presné výsledky. Model prenosového vedenia poskytuje dobrý fyzikálny náhľad na princíp činnosti antény, ale je menej presný. Mikropásikovú anténu možno taktiež popísať ako dutinový rezonátor. Tento model je zložitejší, poskytuje však presnejšie výsledky [2].

Vlnové metódy (angl. full-wave) poskytujú najpresnejšie výsledky, keďže vychádzajú z popisu elektromagnetického poľa na vedení pomocou Maxwellových rovníc. Sú založené na numerických metódach (analytické riešenie Maxwellových rovníc pre planárne vedenie nepoznáme), ktoré vyžadujú vysoký výpočtový výkon [3]. Možno ich deliť podľa spôsobu riešenia rovníc elektromagnetického poľa. Rovnice v integrálnom tvare počíta napríklad momentová metóda (MoM- Method of Moments) formulovaná v spektrálnej alebo v časovej (priestorovej) oblasti. Z diferenciálnych vlnových analýz je známa metóda konečných diferencií v časovej oblasti (FDTD- Finite Difference Time Domain) alebo metóda konečných prvkov (FEM- Finite Element Method) [2].

1.3 Typy mikropásikových antén

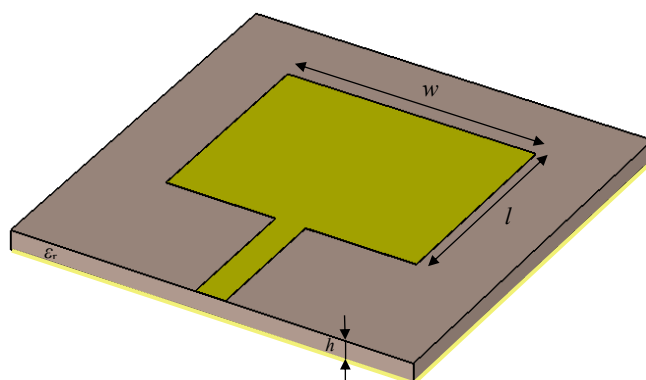
Mikropásikové antény patria do skupiny planárnych antén. Zahŕňajú antény rezonančné, štrbinové a antény s postupnou vlnou. Jedná sa o vyžarovacie prvky rôznych tvarov vyleptané na vhodný dielektrický substrát. Príklady motívov zobrazené na obr. 1.1 patria do skupiny rezonančných antén [1].



Obrázok 1.1 Základné tvary mikropásikových antén.

1.3.1 Fliačiková anténa

Asi najpoužívanější tvar fliačikovej antény je obdĺžnik. Vyleptaná vodivá plocha na povrchu dielektrického substrátu hrúbky h má rozmery $l \times w$, kde l je tzv. rezonančná dĺžka a w je šírka fliačika (obr. 1.2). Zo spodnej strany substrátu je nanosená zemná plocha. Dĺžka fliačika určuje rezonančnú frekvenciu, k vybudeniu najnižšieho pracovného módu by mala mať rozmer rovný približne polovici vlnovej dĺžky rezonančnej frekvencie. Šírka fliačika ovplyvňuje vstupnú impedanciu a tiež šírku pásma: širší fliačik má nižšiu impedanciu a väčšiu šírku pásma. Posunutím napájacieho bodu mimo os symetrie šírky w dochádza k znižovaniu vstupnej impedancie a môže tak byť v určitých medziach nájdené požadované impedančné prispôsobenie. Všeobecne, pravouhlé fliačiky majú zo všetkých tvarov najväčšiu impedanciu a šírku pásma, pretože sú rozmerovo väčšie ako ostatné motívy [2].

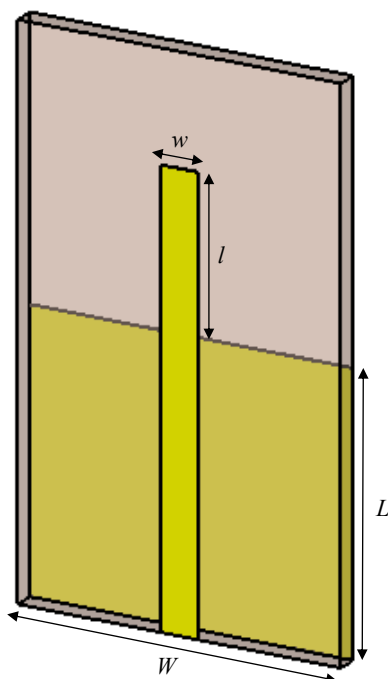


Obrázok 1.2 Pravouhlý mikropásikový fliačik.

1.3.2 Planárny monopol

Jednou z najjednoduchších mikropásikových antén (či antén vôbec) je planárna monopolová anténa. Vyznačuje sa všesmerovou vyžarovacou charakteristikou a jednoduchou štruktúrou. Na obr. 1.3 je ukázaný príklad planárnej monopolovej antény

budenej mikropásikovým napájacím vedením. Samotný monopól s dĺžkou l začína od okraja zemnej plochy o veľkosti $L \times W$ umiestnenej z opačnej strany dielektrického substrátu, je pokračovaním napájacieho mikropásika. Ďalší možný spôsob budenia monopólovej antény je pomocou koplanárneho vlnovodu [4].



Obrázok 1.3 Planárna monopólová anténa budená pomocou mikropásika.

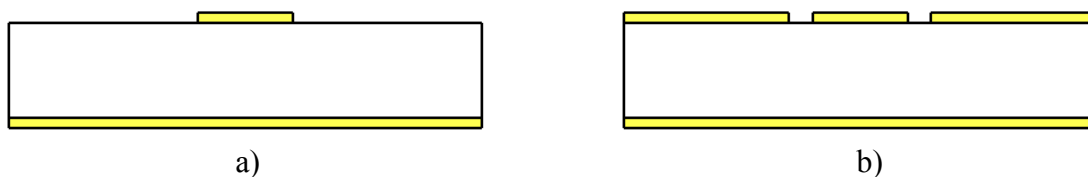
Na planárnu monopólovú anténu možno pozerat' ako na rezonátor mikropásikového prenosového vedenia dĺžky $\lambda/2$ naprázdno (s otvoreným koncom) [5]. $\lambda/2$ je polovica vlnovej dĺžky na rezonančnej frekvencii. Okrem polvlnových sú často používané aj štvrtvlnové rezonátory ako monopólové planárne antény. Šírka monopólu w je zvyčajne rovná šírke napájacieho mikropásika, ktorá určuje hodnotu vstupnej impedancie antény. Veľkosť zemnej plochy výrazne ovplyvňuje impedančnú šírku pásma antény.

1.4 Napájanie mikropásikových antén

Všeobecne, anténa je zariadenie slúžiace k príjmu alebo k vysielaniu rádiových signálov. Aby prijímaná elektromagnetická vlna mohla byť ďalej spracovaná, musí sa indukovaný napäťový signál z antény odviesť. Opačne, ku vysielaniu, k vybudeniu rezonancie na anténe je nutné na ňu najskôr priviesť signál. Napájanie mikropásikových antén sa delí podľa spôsobu budenia na priame (galvanické) a nepriame (pomocou elektromagnetickej väzby). Priamym napájaním sa rozumie vodivé spojenie mikropásikového vedenia s okrajom antény (napr. fliačika) alebo tiež budenie prostredníctvom koaxiálnej sondy. Spôsob napájania elektromagnetickou väzbou je rôzny. Často sa používa napr. budenie väzbovej štrbiny mikropásikovým vedením alebo budenie blízkym poľom [1].

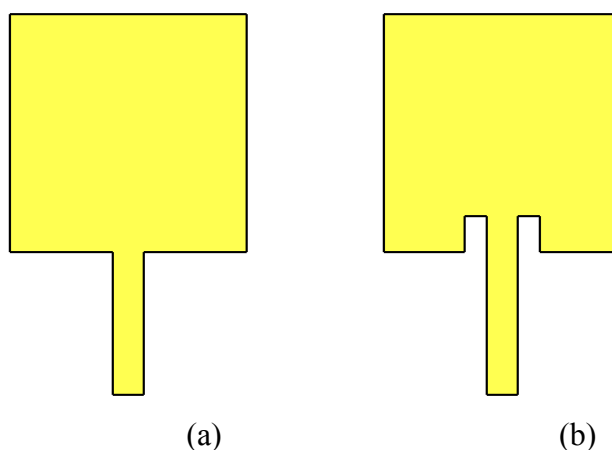
1.4.1 Napájanie na okraji

Jednou zo základných metód budenia mikropásikových antén je napájanie na okraji privedením signálu pomocou mikropásikového vedenia. Ide o konštrukčne najjednoduchšie riešenie, keďže vedenie je galvanicky spojené s anténou a môže byť vyleptané naraz spolu s motívom antény. Z rôznych typov mikropásikového vedenia sa pre mikropásikové antény najčastejšie používa nesymetrické mikropásikové vedenie alebo koplanárny vlnovod (obr. 1.4).



Obrázok 1.4 Vybrané typy mikropásikových vedení: a) nesymetrické mikropásikové vedenie, b) zemnený koplanárny vlnovod.

Cez mikropásikové vedenie napájania možno anténu impedančne prispôbiť voči počiatočnému bodu napájania a to polohou napájania pozdĺž okraja antény. Ďalší spôsob, ako nájsť impedančné prispôsobenie, je vnorenie napájacieho mikropásika bližšie ku stredu žiariča antény, ako je ukázané na obr. 1.5b. Približovaním sa do stredu impedancia klesá. Nevýhodou mikropásikového napájania je nežiaduce vyžarovanie, ktoré môže ovplyvniť výslednú charakteristiku smerového diagramu antény [1].



Obrázok 1.5 Napájanie mikropásikovým vedením: (a) na okraji fliačika; (b) vnorené napájanie.

Nežiaduce vyžarovanie koplanárneho vlnovodu (pri jeho použití ako napájacie vedenie k anténe) je naopak minimálne, pretože je budený v nepárnom móde viazaného vedenia. V tomto móde, sú paralelné magnetické prúdy v oboch štrbinách koplanárneho vlnovodu takmer v protifáze a teda vyžarovanie je zanedbateľné [6].

1.5 Parametre mikropásikových antén

Ako každé zariadenie, aj mikropásikové antény možno popísať niekoľkými parametrami. Niektoré z nich sú uvedené v nasledujúcej časti. Všetky boli čerpané z multimediálnej učebnice [3].

1.5.1 Vstupná impedancia a impedančná šírka pásma

Vstupná impedancia antény Z_{vst} je impedancia, ktorú by sme namerali na vstupných svorkách antény. Skladá sa z odporu žiarenia R_{Σ} (vynásobením odporu žiarenia kvadrátom vstupného prúdu I_{vst}^2 možno vypočítať činný vyžiarovaný výkon), zo stratového odporu R_{str} ($R_{\text{str}} \cdot I_{\text{vst}}^2$ udáva výkon, ktorý sa v anténe a v jej okolí mení na teplo) a z reaktancie žiarenia X_{Σ} (popisuje vzájomnú výmenu „prelievanie“ energie medzi anténou a elektromagnetickým poľom v jej okolí).

$$Z_{\text{vst}} = R_{\Sigma} + R_{\text{str}} + X_{\Sigma} \quad (1)$$

Impedančná šírka pásma je definovaná ako interval frekvencií, v ktorom do antény vstupuje 90% privádzanej energie (resp. maximálne 10 % energie sa odráža späť ku generátoru). Popísanej situácii zodpovedá veľkosť modulu činiteľa odrazu -10 dB a pomer stojatých vln rovný približne dvom.

1.5.2 Činiteľ smerovosti, smerová charakteristika a zisk

Činiteľ smerovosti D popisuje, do ktorých smerov vyžaruje anténa väčší výkon a do ktorých výkon menší. Činiteľ smerovosti nadobúda hodnotu väčšiu ako jedna v tých smeroch, do ktorých zdroj žiarenia (anténa) žiarenie sústreďuje, a hodnotu menšiu ako jedna v tých smeroch, v ktorých je žiarenie potlačované. Činiteľ smerovosti všesmerového (izotropného) zdroja má pre všetky smery hodnotu jedna.

Smerová charakteristika (smerový diagram) je grafickým vyjadrením smerových vlastností antény. Smerové vlastnosti sa vyjadrujú ako absolútna hodnota podielu elektrickej intenzity vyžarovaného vlnenia v danom smere a najvyššej hodnoty intenzity vyžarovaného vlnenia (obe hodnoty sú počítané vo vzdialenej zóne antény). Smerová charakteristika sa väčšinou vykresľuje pre určitú rovinu (napr. pre rovinu kolmú k dipólu alebo pre rovinu, v ktorej dipól leží).

Zisk antény je daný vzťahom

$$G_{\text{abs}} = \eta \cdot D_{\text{max}} \quad (2)$$

kde účinnosť antény η je definovaná vzťahom (3).

1.5.3 Účinnosť

Účinnosť antény sa definuje pomerom vyžarovaného výkonu ku príkonu. Dá sa odvodiť jednoduchý vzťah,

$$\eta = \frac{R_{\Sigma \text{vst}}}{R_{\Sigma \text{vst}} + R_{\text{str}}} \quad (3)$$

kde $R_{\Sigma \text{vst}}$ je odpor žiarenia vzťahnutý k vstupnému prúdu a R_{str} je stratový odpor antény vzťahnutý k vstupnému prúdu. Dobrá účinnosť antény je podmienená malým stratovým odporom alebo veľkým odporom žiarenia. Naopak nízku účinnosť majú antény s malým odporom žiarenia (antény krátke voči dĺžke vlny).

1.5.4 Polarizácia

Polarizácia antény opisuje orientáciu vyžarovaného vektora intenzity elektrického poľa E v smere šírenia vzhľadom k definovanej rovine. Všeobecne existuje polarizácia vlny lineárna alebo eliptická.

Vlna je lineárne polarizovaná, ak má vektor E počas celej periódy rovnaký smer. Ak znázorníme vektor okamžitej hodnoty intenzity šípkou, potom sa jej dĺžka mení počas polperiódy od nuly do maxima a späť, počas druhej polperiódy sa opakuje to isté len s opačnou orientáciou. Koncový bod sa pohybuje úsečke.

Ak je vlna elipticky polarizovaná, jej vektor intenzity elektrického poľa počas periódy mení svoj smer. Šípka znázorňujúca okamžitú hodnotu intenzity poľa sa počas periódy otáča a súčasne mení svoju dĺžku tak, že sa jej koncový bod pohybuje po elipse. Tú obehne práve za jednu periódu. V špeciálnom prípade sa koncový bod vektora môže pohybovať po kružnici (kruhovú polarizáciu). Eliptická (kruhovú) polarizácia môže byť pravotočivá alebo ľavotočivá. Zmysel otáčania sa posudzuje v smere šírenia vlny. Elipticky polarizovanú vlnu možno považovať za superpozíciu dvoch koherentných lineárne polarizovaných vln, ktorých vektory E kmitajú v rôznych smeroch so vzájomným nenulovým fázovým posuvom.

Pri šírení vlny v blízkosti rozhrania dvoch prostredí rozlišujeme polarizáciu kolmú a polarizáciu rovnobežnú vzhľadom k rovine dopadu. Rovina dopadu je rovina kolmá ku rovine rozhrania a súčasne rovnobežná so smerom šírenia vlny. Ak je rovinou rozhrania rovina zemského povrchu, potom sa pre vlnu polarizovanú kolmo (na rovinu dopadu) používa termín vlna horizontálne polarizovaná a pre rovnobežne polarizovanú vlnu termín vertikálne polarizovaná vlna.

Kvalita lineárnej polarizácie sa vyjadruje pomocou tzv. krížovej polarizácie, ktorá udáva pomer medzi zložkou elektrickej intenzity v príslušnej rovine antény (rovina E alebo rovina H) a zložkou elektrickej intenzity, ktorá je na túto užitočnú zložku kolmá.

1.6 Vplyv dielektrického substrátu na parametre mikropásikovej antény

Dielektrický substrát tvorí nosnú podložku, na ktorú je nanesený motív mikropásikovej antény, a je základným konštrukčným prvkom antény, ktorý svojimi vlastnosťami, ovplyvňuje celkové prevedenie mikropásikovej antény. Medzi základné vlastnosti substrátu patrí relatívna permitivita ϵ_r , stratový činiteľ $\tan \delta$ a jeho teplotná a frekvenčná stálosť. Ďalej tepelná vodivosť, homogenita, izotropnosť materiálu, rozmerová stabilita (teplotná, vlhkosťou, starnutím) a v neposlednom rade tiež pružnosť, krehkosť a mechanická opracovateľnosť [1].

Základné dopady hrúbky h a relatívnej permitivity ϵ_r na parametre mikropásikovej antény sú znázornené na obr. 1.3 a 1.4. Aj keď ukázané grafy sú merané pre pravouhlý fliačik, pre mikropáskové antény iných tvarov dosahujú rovnaké závislosti podobné priebehy. Závislosť impedančnej šírky pásma (pre pokles o 10 dB) na hrúbke substrátu pre rôzne hodnoty dielektrickej konštanty ϵ_r je uvedená na obr. 1.6. Z grafu vyplýva, že hrubší substrát spolu s nižšou relatívnou permitivitou dosahuje väčšiu šírku pásma antény. Avšak s rastúcou hrúbkou klesá účinnosť vyžarovania antény (obr. 1.7).

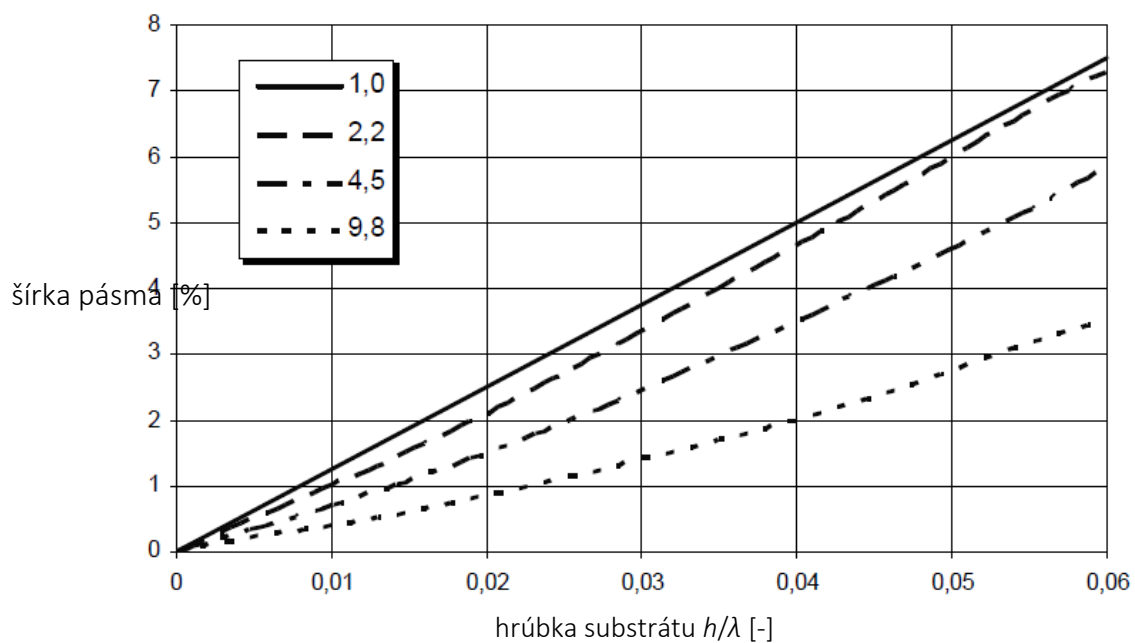
Relatívna permitivita dielektrického substrátu ϵ_r má významný vplyv na veľkosť antény vyplývajúci zo vzťahu pre rezonančnú dĺžku l pravouhlého fliačika, ktorá sa rovná polovici vlnovej dĺžky λ_g

$$l = \frac{\lambda_g}{2} = \frac{v_p}{2 \cdot f_0} = \frac{c}{2 \cdot f_0 \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

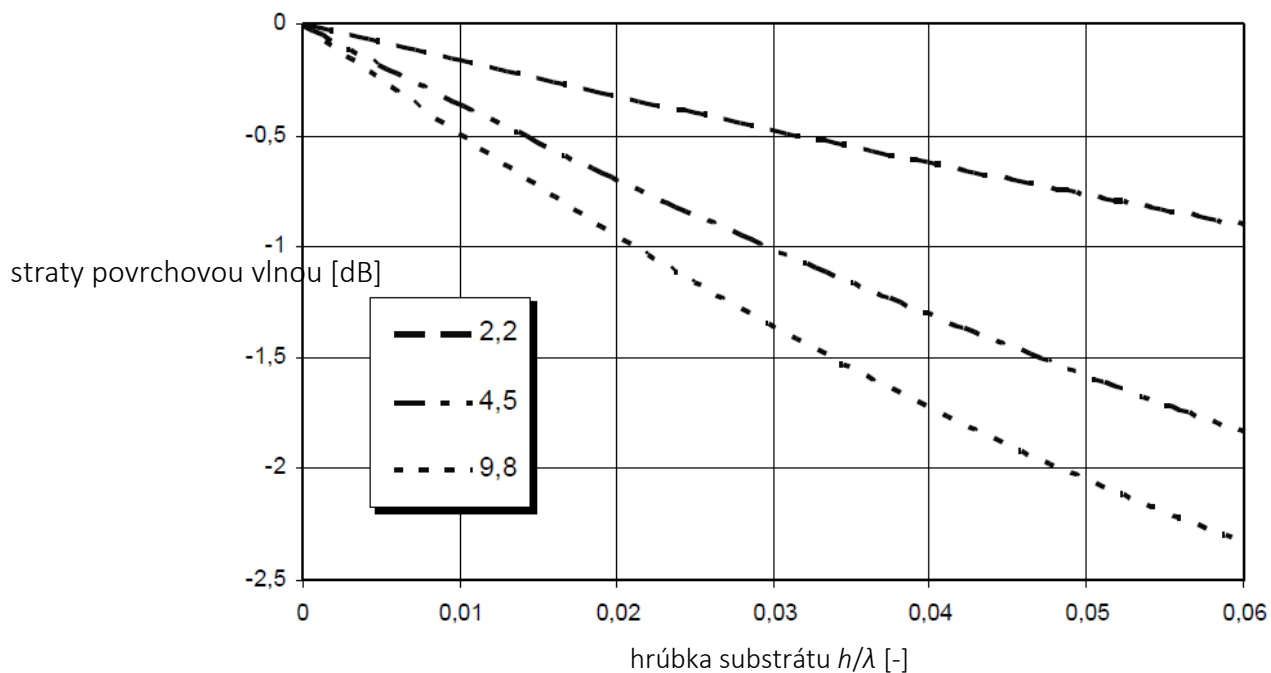
kde c je rýchlosť svetla vo vákuu, f_0 je pracovná frekvencia antény a ϵ_r je relatívna permitivita použitého dielektrického substrátu.

Anténa vyrobená z materiálu s nižšou ϵ_r je teda fyzicky väčšia ako anténa z materiálu s väčšou ϵ_r . Čím je hodnota relatívnej permitivity vyššia, tým je rezonančná dĺžka menšia, a teda aj plocha antény je menšia. Menšia účinná plocha pojme menej výkonu, anténa preto pracuje s menšou účinnosťou a má tým pádom aj menšiu smerovosť. So zvyšujúcou sa relatívnou permitivitou substrátu je väčšia časť činného výkonu vnútri dielektrickej podložky, čím sa znižuje intenzita rozptylového elektrického poľa na okrajoch antény, a preto účinnosť antény klesá (obr. 1.7).

S mikropásikovými anténami sú spojené tri druhy strát: straty vo vodičoch (vyžarovacích plochách), straty v dielektriku a straty vplyvom šírenia povrchovej vlny. Straty vo vyžarovacej ploche sú zapríčinené hlavne rezistívnymi stratami a vysokofrekvenčným povrchovým (plošným) odporom. Straty v dielektriku sú priamo úmerné stratovému činiteľu $\tan \delta$ použitého materiálu substrátu. Straty vplyvom šírenia povrchovej vlny sú spôsobené šírením elektromagnetickej vlny pozdĺž rozhrania vzduch-dielektrikum. Tieto straty závisia na charakteristike materiálu, hlavne na permitivite a hrúbke dielektrického substrátu [1].



Obrázok 1.6 Vplyv hrúbky dielektrického substrátu na šírku pásma mikropásikovej antény pre rôzne hodnoty relatívnej permitivity substrátu, [1].



Obrázok 1.7 Vplyv hrúbky dielektrického substrátu na straty vplyvom šírenia povrchovej vlny pre rôzne hodnoty relatívnej permitivity substrátu, [1].

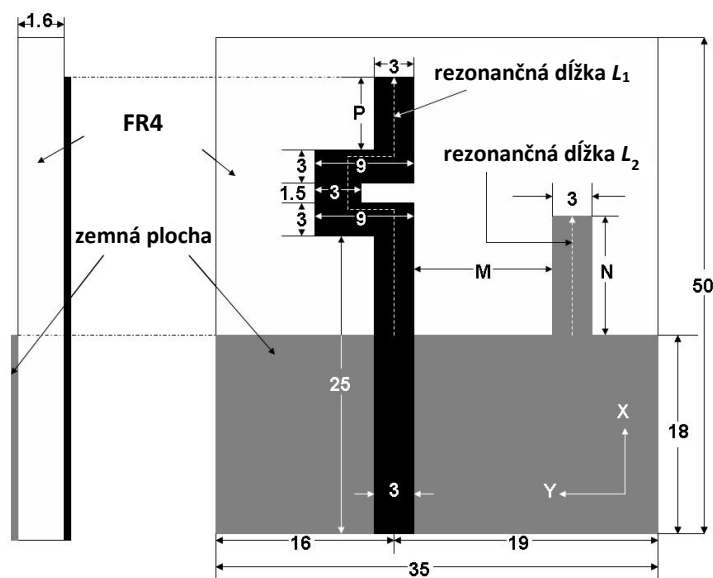
2 NÁVRH DVOJPÁSMOVEJ ANTÉNY

2.1 Popis vybraných vhodných konceptov dvojpásmových antén

Náš návrh planárnej dvojpásmovej antény na textilnom substráte pracujúcej v pásmach ISM 2,4 GHz a 5,8 GHz je založený na použití štruktúry už navrhnutých dvojpásmových antén publikovaných v [7] a [8], pre ktoré bol ale použitý ako dielektrický substrát materiál FR4. Vybrané prevedenia sú následne transformované na zvolený textilný substrát.

2.1.1 Dvojpásmová monopólová anténa so zloženým pásikom a s pahýľom v zemnej ploche

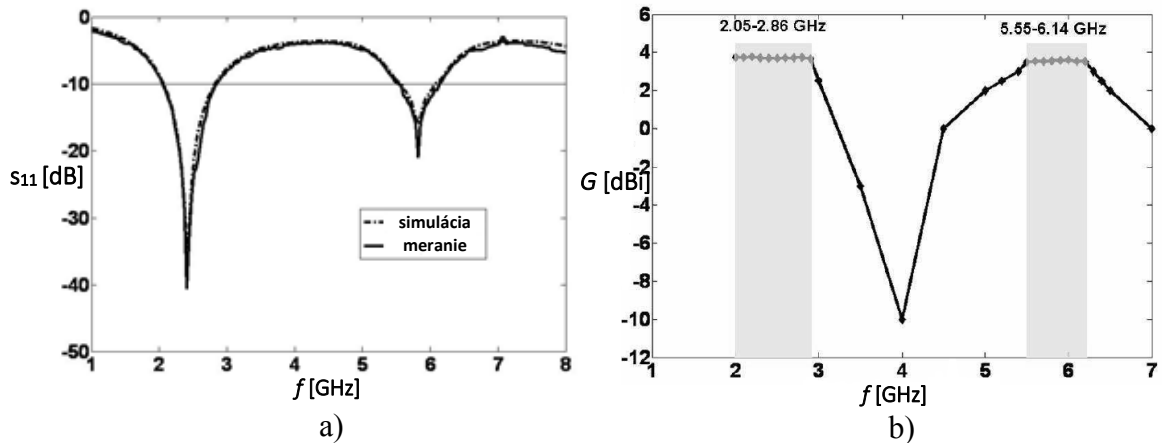
Štruktúra a rozmery tejto antény sú uvedené na obr. 2.1. Substrát tvorí dielektrický materiál FR4, ktorý má relatívnu permitivitu 4,4 a hrúbku 1,6 mm. Je použité mikropásikové napájanie, s impedanciou mikropásika $50\ \Omega$. Anténa má dve rezonančné cesty: prvá je v zloženom pásiku s dĺžkou $L_1 = 31,3\text{ mm}$, čo je približne polovica vlnovej dĺžky v dielektriku substrátu na prvej rezonančnej frekvencii $f_1 = 2,45\text{ GHz}$; druhá rezonančná cesta je v pahýli zemnej plochy s dĺžkou $L_2 = N = 12\text{ mm}$, čo je približne polovica vlnovej dĺžky na druhej rezonančnej frekvencii $f_2 = 5,8\text{ GHz}$. Pre vyladenie antény na požadované frekvencie sú významné rozmery P a N , ktoré ovplyvňujú dĺžku rezonančných ciest a tiež vzdialenosť M medzi zloženým pásikom a pahýľom, ktorá ovplyvňuje vzájomnú elektromagnetickú väzbu medzi rezonančnými dĺžkami. Vplyv týchto parametrov je ukázaný v [7] ich postupným rozmetaním, zatiaľ čo hodnoty ostatných rozmerov sú konštantné. Rozmery zemnej plochy tiež výrazne ovplyvňujú rezonancie antény, hlavne ich impedančnú šírku pásma.



Obrázok 2.1 Geometria dvojpásmovej monopólovej antény, [7].

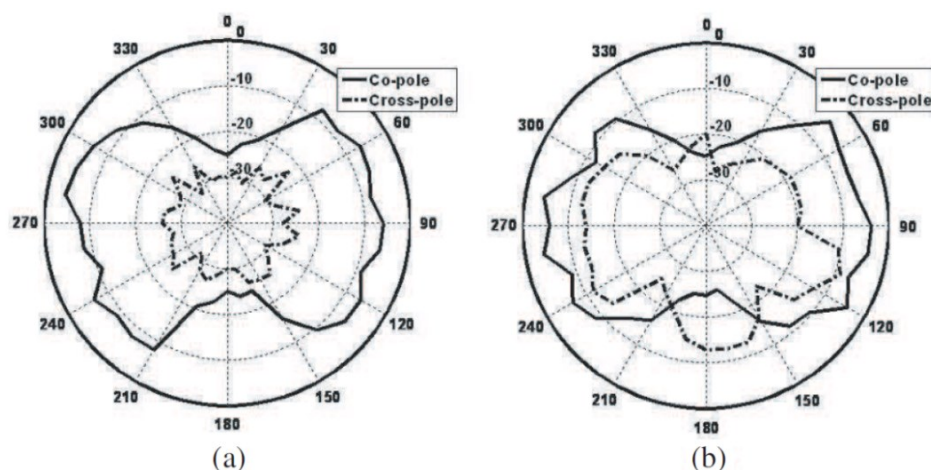
$M = 8\text{ mm}$, $N = 12\text{ mm}$, $P = 4,8\text{ mm}$.

Na 2,4 GHz má činiteľ odrazu hodnotu -40,48 dB s pomernou šírkou pásma 32,99 %, na 5,8 GHz je činiteľ odrazu -20,21 dB s pomernou šírkou pásma 10,11 %, obr. 2.2a. Obr. 2.2b ukazuje meraný zisk. V oboch pásmach sú hodnoty zisku v celej šírke pásiem takmer zhodné. Priemerný zisk v prvom pásme (2,05 - 2,86 GHz) je 3,73 dBi, v druhom pásme (5,55 - 6,14 GHz) má hodnotu 3,57 dBi.



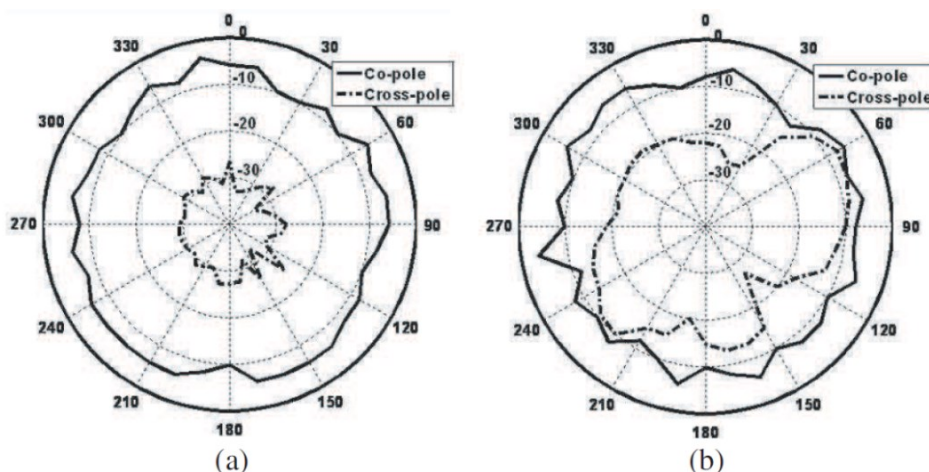
Obrázok 2.2 Graf činiteľa odrazu a) a meraného zisku b) dvojpásmovej monopólovej antény, [7].

Merané smerové charakteristiky vyžarovania sú zobrazené na obr. 2.3 v rovine E a na obr. 2.4 v rovine H pre obe rezonančné frekvencie. Súhlasná zložka polarizácie v E rovine meraná na 2,4 GHz aj 5,8 GHz je smerová na 90° a 270° . Křížová zložka polarizácie v E rovine dosahuje na 2,4 GHz približne -30 dBi vo všetkých smeroch, na 5,8 GHz cca medzi -10 dBi až -20 dBi.



Obrázok 2.3 Merané smerové charakteristiky vyžarovania dvojpásmovej monopólovej antény v rovine E na (a) 2,4 GHz a (b) 5,8 GHz, [7].

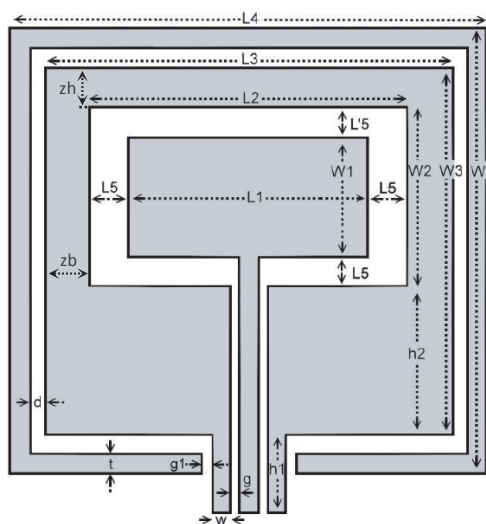
Súhlasná zložka polarizácie vyžarovacej charakteristiky v H rovine na 2,4 GHz aj 5,8 GHz je takmer všesmerová. Křížna zložka polarizácie v H rovine dosahuje na 2,4 GHz okolo -30 dBi vo všetkých smeroch a na 5,8 GHz medzi -10 dBi až -20 dBi.



Obrázok 2.4 Merané smerové charakteristiky vyžarovania dvoj pásmovej monopólovej antény v rovine H na (a) 2,4 GHz a (b) 5,8 GHz, [7].

2.1.2 Dvoj pásmová štrbinová anténa budená koplánárnym vlnovodom

Táto anténa opísaná v [8] je navrhnutá na pokrytie troch pásiem 2,5/3,5/5,7 GHz používaných vo WiMAX systéme. Obr.2.5 ukazuje rozmery a štruktúru antény, ktorá je vyleptaná na substráte z dielektrika FR4 s hrúbkou 1,6 mm. Stredný vodič koplánárneho vlnovodu je predĺžený a rozšírený vnútri štrbiny zemnej plochy do tvaru obdĺžnikového fliačika. Vhodným nastavením rozmerov vnútorného fliačika je dosiahnutá rezonancia na 3,5 a/alebo 5,7 GHz. Rezonancia na 2,5 GHz je určená najmä obvodovými rozmermi štrbiny. K zvýšeniu výkonu antény v pásme 5 – 6 GHz je pridaný vonkajší parazitný prstenec. Hodnoty jednotlivých rozmerov antény sú uvedené v tabuľke 2.1.

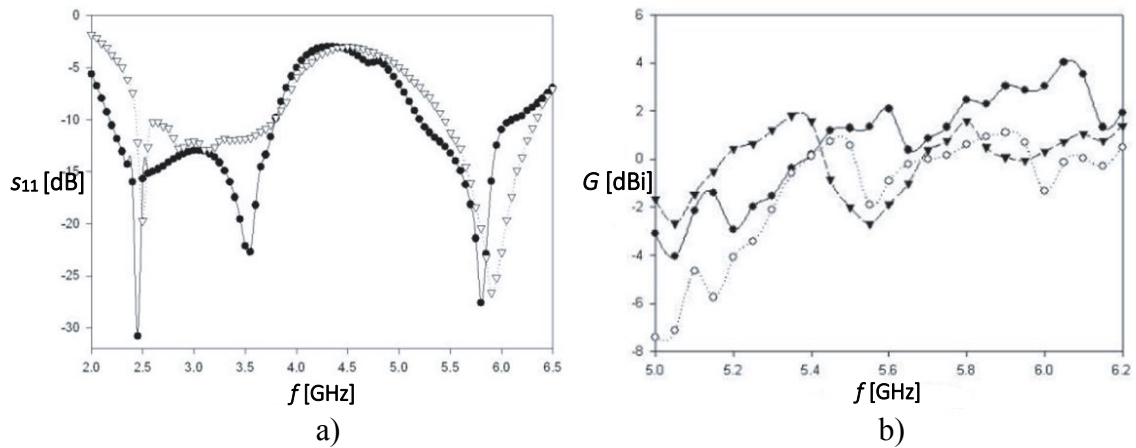


Obrázok 2.5 Geometria dvoj pásmovej štrbinovej antény, [8].

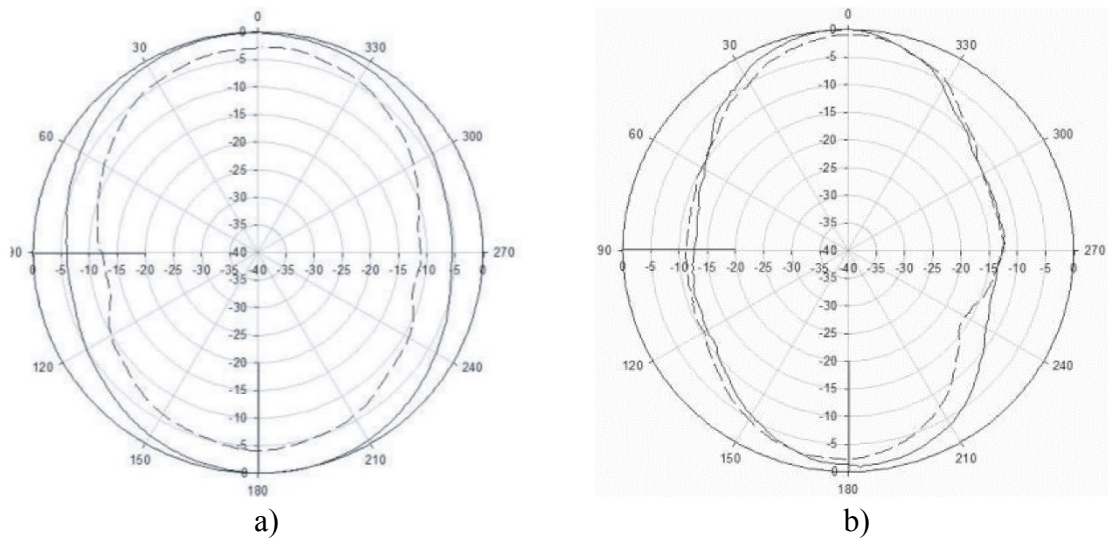
Tabuľka 2.1 Rozmery dvoj pásmovej štrbinovej antény s koplánárnym vlnovodom.

rozmer	L_3	W_3	L_2	W_2	L_1	W_1	h_1	h_2	L_5	w	g	t	d	g_1	z_b	z_h
[mm]	38	42	32	18	28	14	8	15	2	2	0,2	2	2	1	3	9

Na obr. 2.6a je zobrazený meraný a simulovaný modul činiteľa odrazu pre anténu s rozmermi uvedenými v tab. 2.1. Pomerná šírka všetkých pásiem je okolo 15 %. Účinok vonkajšieho parazitného prstenca na zisk antény je ukázaný na obr. 2.6b, kde podľa merania možno vidieť zvýšenie zisku antény s prstencom nad hodnotu 2 dBi v pásme 5-6 GHz. Priame pripojenie vonkajšieho prstenca k zemnej ploche je realizované zrušením medzery g_1 , $g_1 = 0$ mm. Na nižšom pásme 2,5/3,5 GHz zisk antény kolíše medzi 2 – 4 dBi. Zo smerových charakteristík vyžarovania meraných v rovine H (obr. 2.7) možno vidieť zvýšenie zisku antény s prstencom aj v nižšom pásme (obr. 2.7a), aj keď to nevyplývalo zo simulácií [8].



Obrázok 2.6 Graf činiteľa odrazu a) a meraného zisku b) dvojpásmovej štrbinovej antény, [8].
a) ●: simulácia; ▽: meranie. b) ● s vonkajším prstencom; ▽: s priamo pripojeným prstencom; ○: bez prstenca.



Obrázok 2.7 Smerové charakteristiky vyžarovania dvojpásmovej štrbinovej antény v rovine H na a) 2,5 GHz a b) 5,7 GHz (plná čiara- anténa s vonkajším prstencom, prerušovaná čiara- anténa bez prstenca), [8].

2.2 Transformácia antén na textilný substrát

Uvedené dvojpásmové antény sú navrhnuté na dielektriku FR4, ktoré má hodnotu relatívnej permitivity $\epsilon_r = 4,4$. Relatívna permitivita textilných materiálov používaných ako dielektrický substrát pre antény, či textilných materiálov všeobecne má hodnotu menšiu ako 2. Z uvedeného vyplýva, že kvôli nižšej relatívnej permitivite, z ktorej vyplýva menšie skrátenie vlnovej dĺžky sa rozmery antény použitím textilného substrátu zvýšia. Ako substrát našej antény bol vybraný materiál 3D textil, ktorý má relatívnu permitivitu 1,2 a hrúbku 2,6 mm. Predtým ako možno pristúpiť k samotnému modelovaniu a optimalizácii antény, je vhodný aspoň približný prepočet hodnôt jej nosných rozmerov.

2.2.1 Rozmery monopólovej antény

Dĺžky rezonančných ciest L_1 a L_2 monopólovej antény pri použití 3D textilu ako substrátu možno určiť podľa vzťahu (4), keďže podľa rozboru štruktúry majú obe cesty dĺžku $\lambda_g/2$.

$$L_1 = \frac{c}{2 \cdot f_1 \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 2,45 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{1,2}} = 55,89 \doteq 56 \text{ mm} \quad (5)$$

$$L_2 = \frac{c}{2 \cdot f_2 \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 5,8 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{1,2}} \doteq 23,6 \text{ mm} \quad (6)$$

Dosadením rezonančných frekvencií dostávame priamo výšku $N = L_2$ pahýľa zemnej plochy a celkovú rezonančnú dĺžku L_1 zloženého pásika. Jednotlivé rozmery zloženého pásika boli určené pomerne podľa rozmerov pôvodnej štruktúry, rozmery meandra na pásiku boli ponechané rovnaké. Rezonančná dĺžka L_1 sa podľa obr. 2.8 skladá z týchto rozmerov:

$$L_1 = h_S + 2 \cdot w_{FS} + h_{FS} + P + 8 \cdot \frac{w}{2} \quad (7)$$

Rozmery zemnej plochy boli určené tiež približne. Šírku zemnej plochy w_g (rovná sa šírke dielektrického substrátu) možno vyjadriť ako súčet dĺžok:

$$w_g = W = x + M + y + 2 \cdot w = 14,5 + 16 + 6,5 + 2 \cdot 3 = 43 \text{ mm} \quad (8)$$

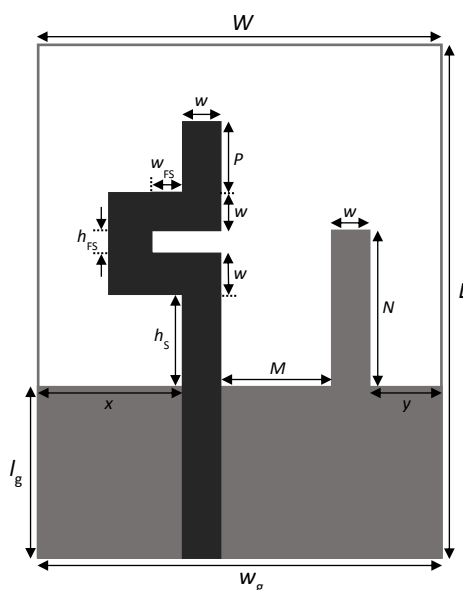
kde x je vzdialenosť zloženého pásika od ľavého okraja zemnej plochy (pri pohľade spredu, pozri obr. 2.8), y je vzdialenosť pahýľa od pravého okraja substrátu, M je vzdialenosť medzi zloženým pásikom a pahýľom a w je šírka mikropásika. Hodnoty dĺžok x a y boli použité z pôvodného návrhu, vzdialenosť M sme určili odhadom, $M = 16$ mm. Výška zemnej plochy l_g (čo je aj dĺžka napájacieho mikropásika antény) bola počiatočne nastavená na štvrtinu vlnovej dĺžky rezonančnej frekvencie $f_1 = 2,45$ GHz.

$$l_g = \frac{\lambda_g}{4} = \frac{c}{4 \cdot f_1 \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 2,45 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{1,2}} = 27,94 \doteq 28 \text{ mm} \quad (9)$$

Nakoniec, výška substrátu bola určená na 85 mm tak, aby jeho horný okraj bol v dostatočnej vzdialenosti od konca zloženého pásika, približne 10 mm, podobne ako v pôvodnom návrhu. Šírka mikropásika w bola ponechaná zatiaľ na pôvodnej hodnote 3 mm. Kompletný zoznam počiatočných hodnôt rozmerov antény je uvedený v tabuľke 2.2. podľa obr. 2.8.

Tabuľka 2.2 Počiatočné rozmery návrhu monopólovej antény na 3D textile.

rozmer	N	M	P	h_s	w_{FS}	h_{FS}	l_g	w_g	W	L	w	x	y
[mm]	23,6	16	15	21,5	3	1,5	28	43	43	85	3	14,5	6,5



Obrázok 2.8 Štruktúra monopólovej antény s rozmermi podľa tabuľky 2.2.

Vypočítané rezonančné dĺžky antény by mohli byť presnejšie určené nahradením relatívnej permitivity ϵ_r efektívnou permitivitou ϵ_{eff} vo výpočtových vzťahoch (5) a (6). To však nie je potrebné, postačuje úvodný odhad, keďže pre ďalšie rozmery (M , l_g , w_g , h_{FS} , atď.) neexistujú ani približné výpočtové vzťahy. Výsledné hodnoty rozmerov antény sú určené pomocou optimalizácie.

2.2.2 Rozmery štrbinovej antény

Prepočet rozmerov (resp. ich počiatočný odhad) štrbinovej antény výrazne uľahčuje jej štruktúra. Podľa relatívnej permitivity textilného substrátu sa prepočítajú rozmery (dĺžka W_1 , šírka L_1) vnútorného fliačika, ďalšie dĺžky a šírky ($W_2, L_2, W_3, L_3, W_4, L_4$) sa odvíjajú od tejto hodnoty. Šírka vnútornej štrbiny L_5 ako aj šírka g štrbiny a vnútorného vodiča w koplanárneho vlnovodu boli ponechané podľa pôvodného návrhu. Hodnoty ostatných rozmerov (h_1, h_2, z_b, z_h, t, d) boli tiež ponechané rovnaké. Približná hodnota dĺžky W_1 je

$$W_1 = \frac{\lambda_g}{2} = \frac{c}{2 \cdot f_1 \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 5,8 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{1,2}} = 23,6 \text{ mm} \doteq 24 \text{ mm} \quad (10)$$

Šírka vnútorného fliačika L_1 bola tiež zvolená na hodnotu 40 mm s ohľadom na pomer šírky a dĺžky fliačika v pôvodnom návrhu.

Tabuľka 2.3 Počiatočné rozmery návrhu štrbinovej antény na 3D textile.

rozmer	L_3	W_3	L_2	W_2	L_1	W_1	h_1	h_2	L_5	w	g	t	d	g_1	zb	zh
[mm]	50	52	44	28	40	24	8	15	2	2	0,2	2	2	1	3	9

2.3 Modelovanie antén a analýza v programe CST Microwave Studio

Program CST Microwave Studio (CST- Computer Simulation Technology, ďalej len CST MWS) slúži k 3D modelovaniu, simuláciám a výpočtom elektromagnetických štruktúr a komponentov pracujúcich na vysokých frekvenciách. Elektromagnetický simulátor programu je založený na metóde vlnovej analýzy FIT – Finite Integration Technique, ktorá je veľmi podobná metóde konečných diferencií v časovej oblasti (FDTD). FDTD, avšak rieši Maxwellove rovnice v diferenciálnom tvare, zatiaľ čo FIT používa ich integrálny tvar [3].

V ponuke programu CST MWS je niekoľko solverov- výpočtových metód. Z ponúkaných solverov bol pre naše potreby použitý Time domain (časový) solver, ktorého výpočtová metóda je v nasledujúcom texte bližšie popísaná.

2.3.1 Analýza v časovej oblasti

Numerické modelovanie antén vo frekvenčnej oblasti sa používa, ak nás zaujímajú parametre antén len v úzkom pásme frekvencií. V prípade potreby širokopásmovej analýzy sa namiesto analýzy vo frekvenčnej oblasti používa riešenie v časovej oblasti.

Pri modelovaní v časovej oblasti je analyzovaná štruktúra (anténa) buďená impulzom požadovaného priebehu (často sa používa napr. Gaussova funkcia) a následne je vypočítaná jej časová odozva. Z budiaceho impulzu a vypočítanej odozvy môžu byť získané všetky informácie o analyzovanej štruktúre na tých frekvenciách, ktoré obsahoval vstupný impulz [3].

Výpočet impulznej odozvy analyzovanej štruktúry sa počíta po jej malých častiach, model štruktúry je rozdelený mriežkou ,tzv. mesh, na malé časti (bunky), cez ktoré sa postupne šíri budiaci signál. Rozdelenie na bunky je adaptívne, zámerom delenia štruktúry je, aby prostredie v každej bunke bolo homogénne a preto aj výpočet elektromagnetického poľa v bunke bol relatívne jednoduchý a rýchly.

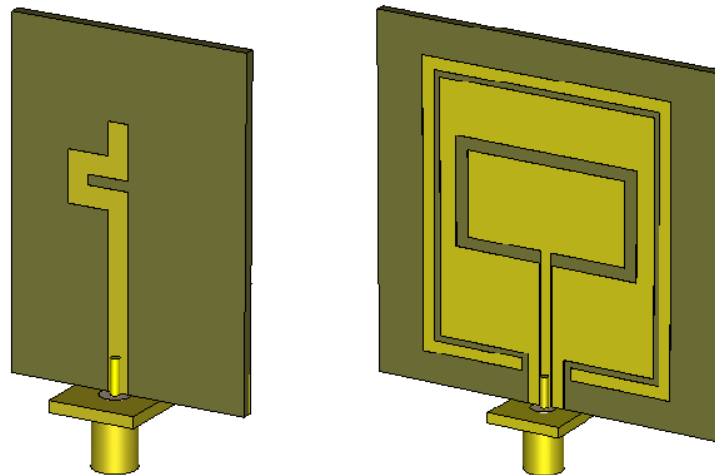
Teda na výpočet širokopásmovej časovej odozvy je potrebná len jedna analýza. Výhodou časového solveru je aj menší nárok na výpočtový výkon, nevýhodou je ale nižšia presnosť oproti skutočnosti a frekvenčnému solveru. Rýchlosť a presnosť výpočtu sú navzájom protichodné požiadavky, keďže sú oba závislé na voľbe jemnosti mriežky a navzájom sú nepriamo úmerné. Pre elektricky veľké štruktúry, kde kvôli disperzii je potrebná veľmi hustá mriežka, je kvôli náročnosti výpočtu časový solver neefektívny, odporúča sa použiť integrálny solver. Časový solver sa tiež nehodí k riešeniu štruktúr, ktorých rozmery sú oveľa menšie, ako vlnová dĺžka, na ktorej má štruktúra pracovať. V tom prípade je výhodnejšie použiť frekvenčný solver [9].

2.3.2 Modelovanie a simulácia antén

Podľa rozmerov uvedených v tabuľkách 2.2 a 2.3 boli v programe CST MWS zostrojené modely oboch typov antén na 3D textile. Štruktúry antén sú modelované parametricky, čo umožňuje zmenu hodnôt rozmerov počas optimalizácie či parametrickej analýze. K modelom antén bol vytvorený a „pripojený“ jednoduchý model SMA konektoru s impedanciou 50 Ohmov (obr. 2.9). Jeho rozmery boli určené podľa katalógového listu [9], priemer vonkajšieho vodiča D bol vypočítaný podľa rovnice pre vlnovú impedanciu koaxiálneho kábla s dielektrikom teflón ($\epsilon_r = 2,1$),

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad (11)$$

kde d je priemer vnútorného vodiča SMA konektoru, μ je absolútna permeabilita a ϵ je absolútna permitivita. Model antény je umiestnený v boxe, ktorého steny sú na nulovom potenciáli, čím sa simuluje voľné prostredie v okolí antény. Aby steny boxu ale príliš neovplyvňovali vyžarovanie antény, musia byť od hrán antény dostatočne vzdialené, aspoň štvrtinu vlnovej dĺžky rezonančnej frekvencie. Anténa je napájaná pomocou vlnovodového portu, ktorý je umiestnený na vstup SMA konektoru. Pre analýzu antény je použitý časový solver, čas jedného výpočtu trvá rádovo pár minút. U štrbinovej antény možno s výhodou využiť tiež symetriu štruktúry a nastavením roviny symetrie znížiť výpočet na polovicu.



Obrázok 2.9 Model monopólovej a štrbinovej antény s pripojeným SMA konektorom, vytvorený v programe CST MWS.

V prvotnom návrhu antén (podľa kap. 2.1) sa priečne rozmery mikropásikového napájacieho vedenia u oboch antén ponechali podľa pôvodného návrhu na FR4, takže pri transformácii motívu na 3D textil sa zmenila jeho impedancia z pôvodnej hodnoty 50 Ω - u mikropásikového vedenia monopólovej antény na 110 Ω , u koplanárneho vedenia štrbinovej antény na 75 Ω . Navyše, kvôli výrobným požiadavkám dielne ústavu UREL sa medzera koplanárneho vedenia $g = 0,2$ mm v štrbinovej anténe musela zväčšiť na 0,5 mm, čím sa taktiež zvýšila aj impedancia vedenia na 95 Ω .

Pri snahe prispôbiť napájacie vedenie ku SMA konektoru, teda na impedanciu $50\ \Omega$, sme narazili na problém príliš veľkých rozmerov: teoretická šírka $50\ \Omega$ mikropásikového vedenia na 3D textile je pre nesymetrické mikropásikové vedenie $w = 11,5\ \text{mm}$ a pre koplanárne vedenie $w = 35\ \text{mm}$ (pri šírke medzery $g = 0,5\ \text{mm}$). Ku tak širokému napájacíemu vedeniu sa však nedá pripojiť SMA konektor, je primalý. Simulácia modelov s prispôbeným mikropásikom ukázala tiež problém so šírkou pásma rezonancie- čím väčšia šírka napájacieho mikropásikového vedenia, tým sa viac zvyšuje šírka pásma rezonancie antény. Taktiež bol problém s vyladením týchto antén na obidve pásma, u monopólovej antény nebola dosiahnutá rezonancia pahýľa zemnej plochy na hornom pásme, u štrbinovej antény zase nebola dosiahnutá rezonancia štrbiny na nižšom požadovanom pásme.

Kompromisným riešením vzhľadom na impedanciu, k nej odpovedajúcu šírku napájacieho mikropásika a taktiež ladiťnosť antény by mohlo byť čiastočné rozšírenie mikropásika a tým zníženie jeho impedancie, napr. nesymetrický mikropásik šírky $w = 6\ \text{mm}$ má impedanciu približne $76\ \Omega$. K tejto šírke napájacieho mikropásika je už ale znovu SMA konektor primalý. Dal by sa síce použiť väčší N-konektor, ale ten je veľký a príliš ťažký pre použitie k anténe na textilnom substráte.

V konečnom modeli obidvoch antén bolo preto z praktického hľadiska napájacie mikropásikové vedenie ponechané neprispôsobené ku $50\ \Omega$ impedancii. Z tohto dôvodu bolo nevyhnutné optimalizovať modely antén na 3D textile s pripojeným SMA konektorom.

2.4 Výsledky modelovania

Vypočítané a odhadnuté rozmery oboch antén (tab. 2.1 a 2.2) boli základom pre prvú simuláciu. Následné ladenie antén bolo uskutočnené experimentálne pomocou parametrickej analýzy a optimalizácie. Keďže napájacie mikropásikové vedenie nebolo prispôsobené na $50\ \Omega$, výsledné rozmery rezonančných dĺžok v anténach príliš nezodpovedajú hodnotám teoreticky vypočítaným.

Pre porovnanie boli tiež namodelované pôvodné návrhy antén na FR4 substráte (podľa zdrojových článkov [7] a [8]). Simulované smerové charakteristiky vyžarovania navrhnutých antén sú zobrazené vo všetkých troch rovinách (rovina E, H a xy), keďže sa jedná o všesmerové antény.

2.4.1 Výsledky modelovania monopólovej antény

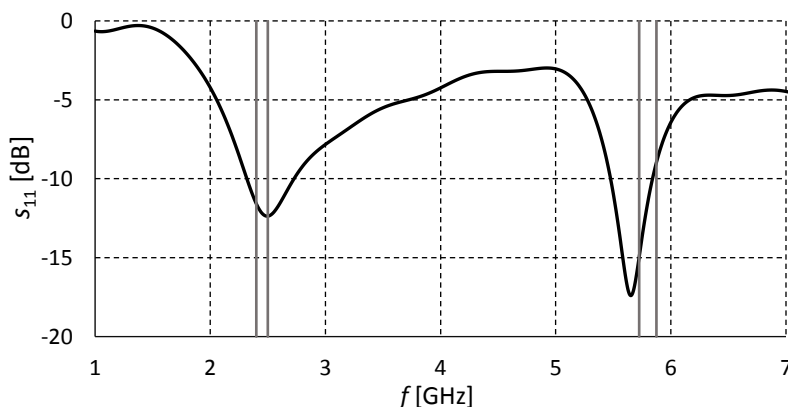
Pri ladení monopólovej antény boli použité a overené poznatky z článku [7] o vplyve parametrov N , M a P na rezonancie antény. Okrem týchto rozmerov sa pri optimalizácii zmenili celkovo rozmery zloženého pásika, okrem šírky w , (w_{FS} , h_{FS} , h_S) a tiež výška zemnej plochy l_g . Kompletne porovnanie zmeny rozmerov antény od ich teoretického výpočtu je uvedené v tab. 2.4.

Tabuľka 2.4 Porovnanie rozmerov a rezonančných dĺžok pred a po optimalizácii modelu monopólovej antény.

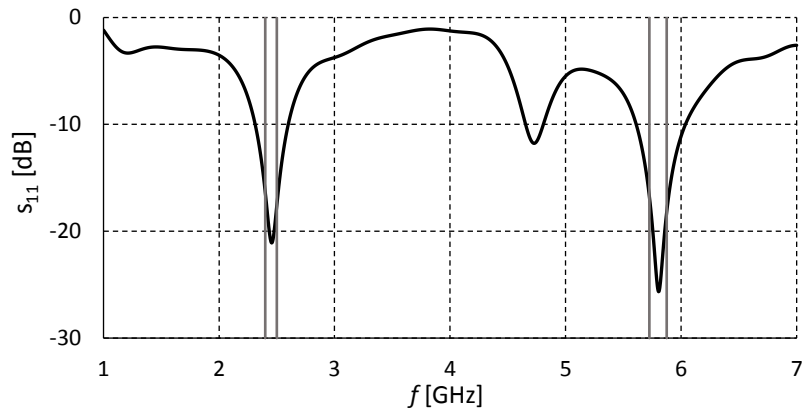
	Rozmer [mm]	Prvotný návrh	Po optimalizácii
pahýľ v zemnej ploche	$N = L_2$	23,6	21,9
vzdialenosť mikropásikov	M	16	16,5
zložený pásik	P	15	9,1
	h_S	21,5	14,2
	w_{FS}	3	4,5
	h_{FS}	1,5	3,4
zemná plocha	l_g	28	38,1
	$w_g = W$	43	43,5
šírka mikropásikov	w	3	3
vzdialenosti mikropásikov od okrajov	x	14,5	14,5
	y	6,5	6,5
rezonančná dĺžka na f_1	L_1	56	47,7
rezonančná dĺžka na f_2	L_2	23,6	21,9

Na obr. 2.10 je zobrazený simulovaný činiteľ odrazu monopólovej antény zostrojenej na FR4 s rozmermi uvedenými podľa [8] v tab 2.1. Na obr. 2.11 je zobrazený simulovaný činiteľ odrazu monopólovej antény na 3D textile. Na oboch obrázkoch sú vyznačené čiarami krajné frekvencie pásiem ISM 2,4 (2,4 - 2,5 GHz) a ISM 5,8 (5,725 – 5,875 GHz). Modelovaná anténa na 3D textile v týchto pásmach dosahuje dostatočné prispôsobenie.

Simulované smerové charakteristiky modelovanej monopólovej antény na 3D textile sú uvedené v prílohe A (obr. A.1 - A.3). Na rozdiel od smerových charakteristík antény na FR4 prezentovaných v [8] ako všesmerové, simulované smerové charakteristiky navrhnutých antén sú oveľa nerovnomernejšie. Taktiež úroveň krížovej zložky vyžarovania je vyššia- často presahuje súhlasnú zložku, najmä v rovine E a H.



Obrázok 2.10 Simulovaný činiteľ odrazu monopólovej antény na FR4 podľa návrhu zo [7].



Obrázok 2.11 Simulovaný činiteľ odrazu monopólovej antény na 3D textile.

Z priebehu simulovaného činiteľa odrazu modelovanej monopólovej antény na 3D textile vidieť, že na frekvencii 4,72 GHz je ďalšia rezonancia. Bohužiaľ sa ju nepodarilo odstrániť ani po viacerých pokusoch- jej eliminácia bola dosiahnutá vždy len na úkor rozladenia antény, resp. nedosiahnutia dostatočného impedančného prispôsobenia v požadovaných pásmach. Faktor prispievajúci ku obtiažnemu ladeniu antény môže byť aj už spomínané neprispôsobenie mikropásikového vedenia na impedanciu 50Ω . Parazitná rezonancia nastáva v zloženom pásiku antény, celková dĺžka zloženého pásika (od SMA konektora) sa totiž približuje polovici vlnovej dĺžky na tejto frekvencii.

2.4.2 Výsledky modelovania štrbinovej antény

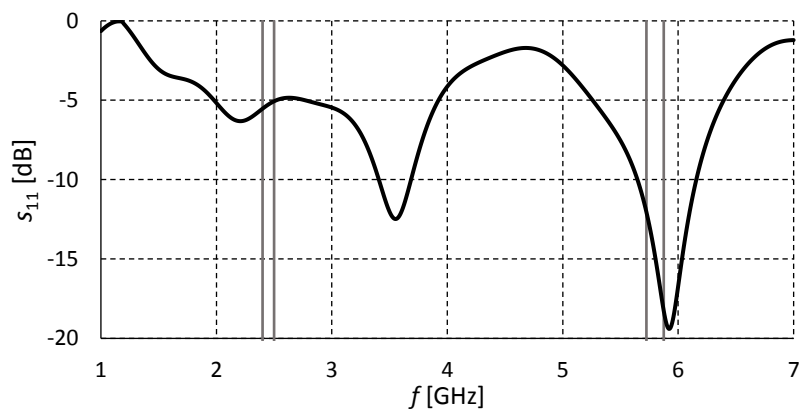
Naladenie štrbinovej antény na požadované frekvencie je podmienené hlavne rozmermi štrbiny a vnútorného fliačika. Jeho dĺžka W_1 ovplyvňuje naladenie na hornú frekvenciu, ale tiež spolu s jeho šírkou L_1 a so šírkou štrbiny ovplyvňuje spodnú rezonanciu. Tiež bola optimalizované rozmery zemnej plochy a koplanárneho vlnovodu (z_b , z_h , h_1 , h_2). Zmena rozmerov od prvotného návrhu pomocou výpočtu je ukázaná v tab. 2.5.

Tabuľka 2.5 Porovnanie rozmerov pred a po optimalizácii modelu štrbinovej antény.

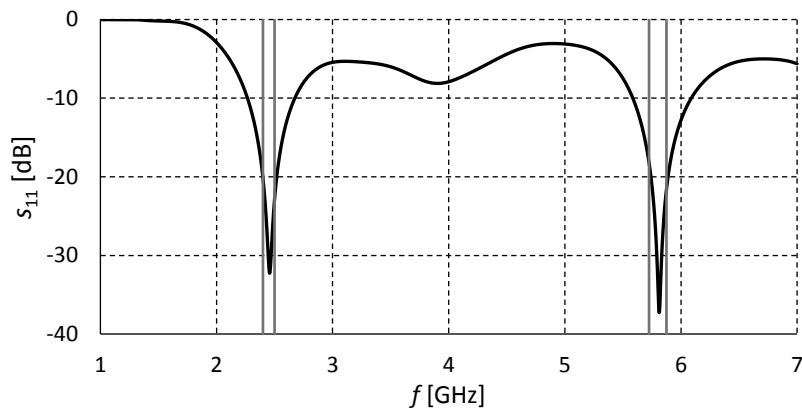
	Rozmer [mm]	Prvotný návrh	Po optimalizácii
zemná plocha	L_3	50	67,9
	W_3	52	45,9
	z_b	3	9,1
	z_h	9	2,2
vnútorný fliačik	L_1	40	45,9
	W_1	24	10,5
šírka štrbiny	L_5	2	1,9
koplanárne vedenie	h_1	8	0
	h_2	15	29,4
	g	0,2	0,5
	w	2	2

Pri optimalizovaní antény na 3D textile kvôli jednoduchšiemu ladeniu bol odstránený vonkajší parazitný prstenec, ktorý podľa [8] zvyšuje výkon antény v hornom pásme. Tiež bol zrušený rozmer h_1 , ktorý po odstránení prstenca už nebol potrebný a preto anténa mohla byť zarovnaná zospodu. Taktiež kvôli výrobným požiadavkám bola rozšírená medzera g v koplanárnom vedení z 0,2 mm na 0,5 mm.

Simulovaný činiteľ odrazu návrhu antény na FR4 s rozmermi z tab. 2.3 podľa [8] je zobrazený na obr. 2.12. Model antény je bez prstenca, nakoľko ten zhoršoval impedančné prispôsobenie antény. Z obrázku vidieť dve horné rezonancie na 3,5 GHz a 5,8 GHz, spodná rezonancia na 2,4 GHz nie je dostatočne vybudená.



Obrázok 2.12 Simulovaný činiteľ odrazu štrbinovej antény na FR4 podľa návrhu z [8] (anténa je bez prstenca).



Obrázok 2.13 Simulovaný činiteľ odrazu štrbinovej antény na 3D textile (anténa je bez prstenca).

Podľa obr. 2.13, modelovaná štrbinová anténa na 3D textile je dostatočne prispôbena v požadovaných pásmach ISM 2,4 a ISM 5,8, ktoré sú vyznačené čiarami.

Simulované smerové charakteristiky štrbinovej antény navrhnujej na 3D textile sú uvedené v prílohe A (obr. A.4 - A.6). Jej vyžarovanie nie je všesmerové ako u štrbinovej antény na FR4 podľa [8], ale smerové a symetrické (podľa rovín symetrie štruktúry antény) a nerovnomerné. V rovine E dokonca prevažuje krížová zložka nad súhlasnou vo všetkých smeroch.

3 VÝROBA A MERANIE DVOJPÁSMOVÝCH ANTÉN

3.1 Výroba antén

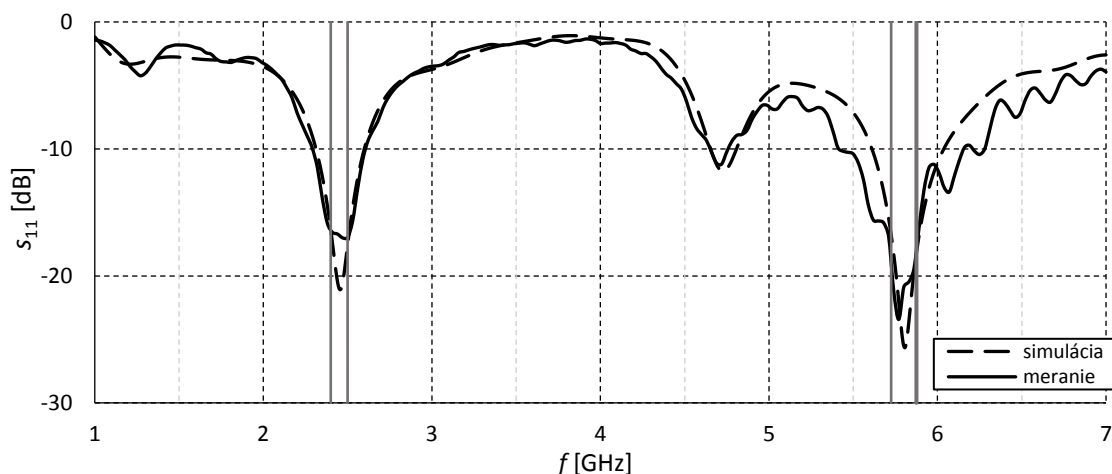
Podľa výsledkov modelovania a simulácií boli navrhnuté antény realizované. Vodivé plochy antén boli vyrobené ako medené fólie v dielni Ústavu radioelektroniky, fakulty elektrotechniky VUT v Brne. Vďaka nanesenému lepidlu zo spodnej strany fólie bolo možné motív antény jednoducho prilepiť na substrát z 3D textilu. K takto zostrojenej anténe sa následne pripájkoval SMA konektor.

Tento „manuálny“ spôsob výroby antény sa neukázal príliš vhodný pre štrbinovú anténu a koplanárne vedenie- je veľmi ťažké dodržať presnosť rozmerov medzier pri prenášaní motívu na 3D textil, keďže ten je ohybný a pružný. Ďalším problémom je, že motív antény nedrží dobre na 3D textile a postupne sa odlepuje. Lepšiu, presnejšiu výrobu antén na textile by bolo možné dosiahnuť napríklad sieťotlačou.

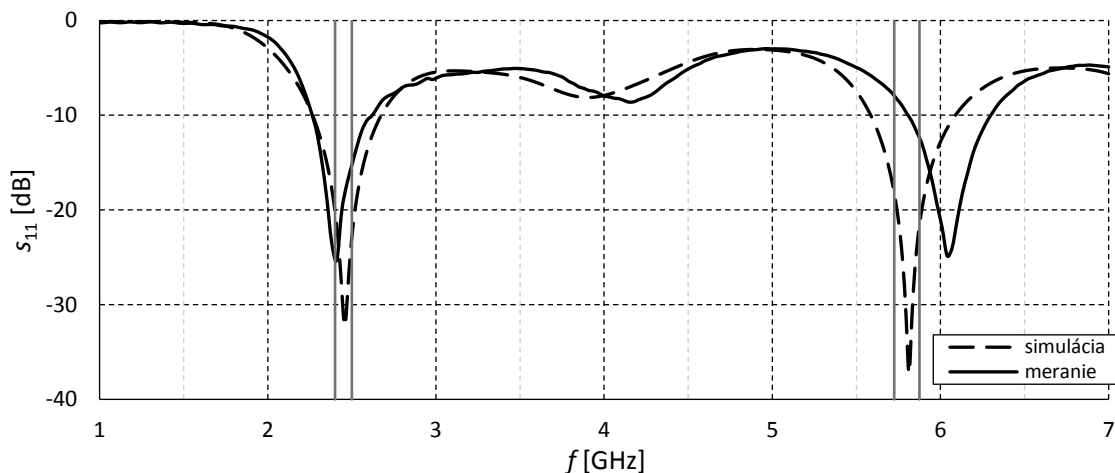
3.2 Meranie impedančného prispôsobenia

Meranie impedančného prispôsobenia vyrobených antén bolo robené pomocou vektorového analyzátoru R&S®ZVL13 vo frekvenčnom pásme 1 GHz – 7 GHz.

Z merania vyplýva, že vyrobená monopólová anténa dostatočne prispôsobená- činiteľ odrazu v celej šírke oboch pásiem je menší ako -15 dB, obr. 3.1. Impedančné prispôsobenie prototypu štrbinovej antény je dostatočné iba v jednom z požadovaných pásiem, v spodnom pásme 2,4-2,5 GHz, obr. 3.2. Rezonancie vyrobenej antény sú totiž posunuté, spodná rezonancia mierne dole, cca o 50 MHz, horná rezonancia však výrazne hore, až o 200-300 MHz. Rozladenie je zapríčinené nepresnosťou výroby, pri prenášaní motívu na 3D textil sa nepodarilo dodržať presne medzery v koplanárnom vedení.



Obrázok 3.1 Impedančné prispôsobenie monopólovej antény.



Obrázok 3.2 Impedančné prispôsobenie štrbinovej antény.

3.3 Meranie smerových charakteristík

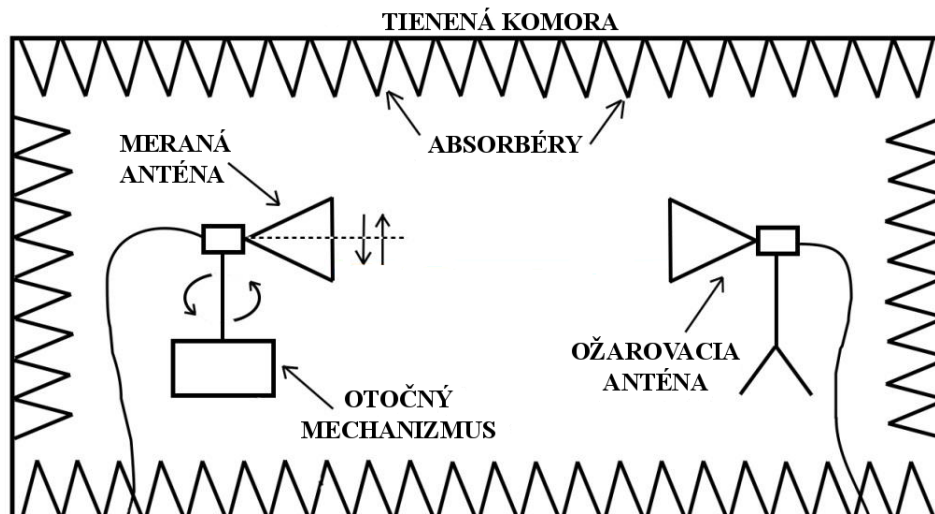
Meranie vyžarovacích charakteristík antén prebiehalo v bezodrazovej komore na ústave UREL fakulty elektrotechniky VUT v Brne. Najskôr sa pomocou obvodového analyzátoru zmeral prenos S_{21_REF} medzi dvoma referenčnými anténami v smere maximálnych hlavných lalokov a potom sa zmeral prenos S_{21_AUT} medzi referenčnou a meranou anténou, pričom bolo merané antény boli otáčané pomocou anténneho skeneru ovládaného počítačom v rozmedzí uhlov 0° až 360° v rovinách E a H na frekvenciách $f_1 = 2,45$ GHz a $f_2 = 5,8$ GHz. Výsledné zisky meraných antén boli dopočítané pomocou známej hodnoty zisku referenčnej antény na daných frekvenciách merania a zmeraných hodnôt jednotlivých prenosov podľa vzťahu:

$$G_{AUT}(\theta, \varphi) = S_{21_AUT}(\theta, \varphi) - (S_{21_REF_max} - G_{REF_max}) \quad (122)$$

kde G_{AUT} predstavuje zisk meraných antén v danom smere, S_{21_AUT} je prenos medzi referenčnou a meranou anténou v danom smere, $S_{21_REF_MAX}$ udáva prenos medzi dvoma referenčnými anténami v maximách vyžarovacích charakteristík a G_{REF_MAX} je zisk referenčnej antény na danej frekvencii v smere maximálneho vyžarovania, [11]. Usporiadanie meracieho pracoviska pre meranie smerových charakteristík antén je zobrazené na obr. 3.3.

Pri meraní bol problém prichytiť antény na skener, keďže 3D textil nie je pevný materiál, neudrží tvar antény. Meraná anténa sa preto musela prilepiť zadnou stranou na kus polystyrénu, pomocou ktorého bola pripevnená na skener. Kvôli tomu mohli byť jednotlivé merania naraz uskutočnené iba v jednej polrovine antény v rozmedzí uhlov -90° až 90° , následne sa musela anténa otočiť, nalepiť opačnou stranou na polystyrén a zmerať v druhej polrovine. Vyžarovacie charakteristiky antén boli merané ba v rovine E a v rovine H.

Na obr. 3.4 až 3.7 sú v jednom grafe zobrazené zmerané aj simulované charakteristiky vyžarovania monopólovej antény. Na obr. 3.8 až 3.11 sú zobrazené zmerané aj simulované charakteristiky vyžarovania štrbinovej antény. Výsledné hodnoty maximálneho zisku a účinnosti antén sú uvedené v tab. 3.1.



Obrázok 3.3 Usporiadanie meracieho pracoviska pre meranie smerových charakteristík antén, prevzaté z [11].

Tabuľka 3.1 Zmerané a simulované hodnoty maximálneho realizovaného zisku a simulovaná účinnosť antén.

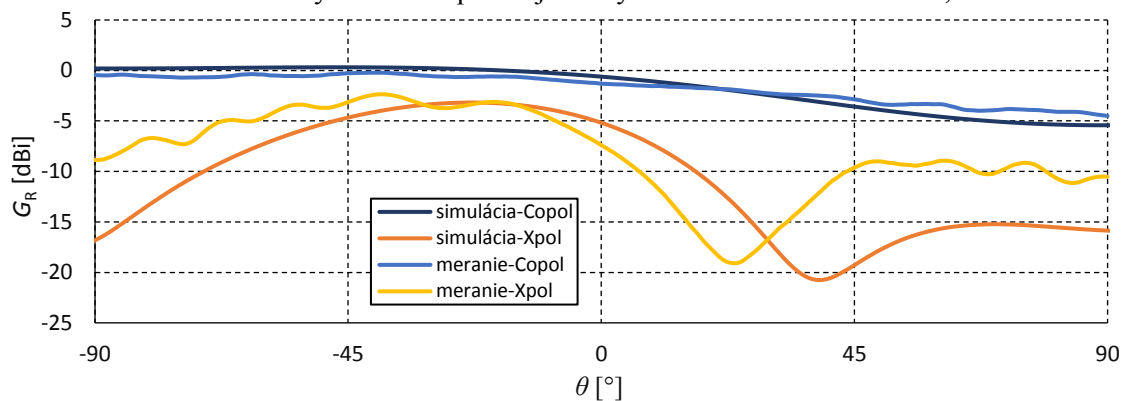
f [GHz]	monopólová anténa		štrbinová anténa	
	meranie G_R [dBi]		meranie G_R [dBi]	
	rovina E	rovina H	rovina E	rovina H
2,45	-0,22	-0,22	4,54	4,05
5,8	-2,06	3,27	4,2	1,83
	simulácia G_R [dBi]		simulácia G_R [dBi]	
	rovina E	rovina H	rovina E	rovina H
	2,45	0,32	1,48	4,63
5,8	-1,98	1,82	5,06	1,58
	simulácia- účinnosť [dB]		simulácia- účinnosť [dB]	
	2,45	-0,15	-0,06	
	5,8	-0,16	-0,09	

Z porovnania nameraných hodnôt je zrejmé, že štrbinová anténa má väčší zisk oproti monopólovej anténe. Zo simulácií vyplýva, že štrbinová anténa má taktiež väčšiu účinnosť ako monopólová anténa. V simuláciách však neboli pripočítané straty v dielektrickom substráte antény, teda v 3D textile, lebo jeho stratový činiteľ nepoznáme.

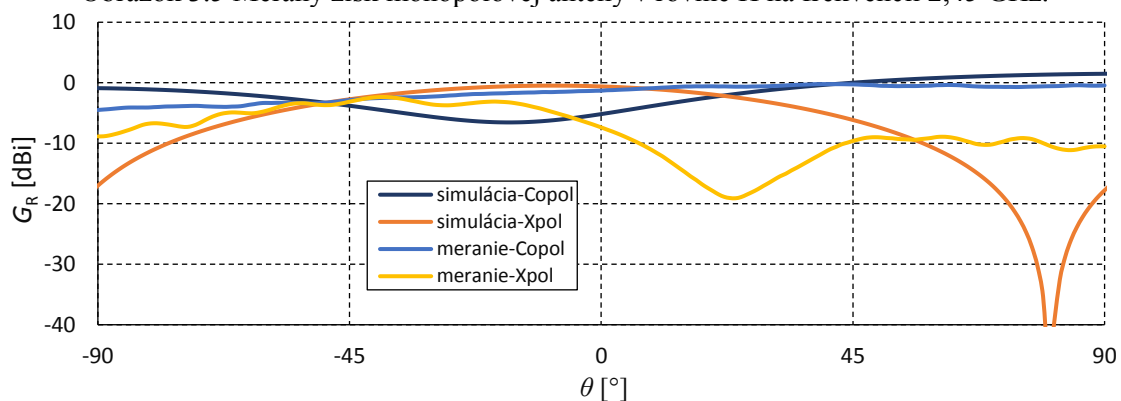
Meranie vyžarovania štrbinovej antény bolo uskutočnené na trochu odlišných frekvenciách, ako boli jej smerové charakteristiky simulované (2,45 GHz a 5,8 GHz), a to na 2,4 GHz a 6,0 GHz, kde je vyrobená štrbinová anténa najlepšie impedančne prispôbena. Napriek tomu je zhoda nameraných a simulovaných výsledkov veľmi dobrá. Namerané smerové charakteristiky monopólovej antény sa od simulovaných líšia viac a to najmä z toho dôvodu, že anténa počas merania nebola v úplne voľnom priestore, keďže musela byť pripevnená ku polystyrénu- ktorý ovplyvnil impedančné prispôbienie, zemná plocha monopólovej antény žiarila počas merania priamo doňho. Na štrbinovú anténu počas merania smerových charakteristík použitý polystyrén nemal

tak veľký vplyv, pretože táto anténa nemá zo spodnej strany substrátu vodivý motív na rozdiel od monopólovej antény. Vplyv polystyrénu (jemné zvlnenie charakteristík) však možno vidieť aj v meraných vyžarovacích charakteristikách štrbinovej antény.

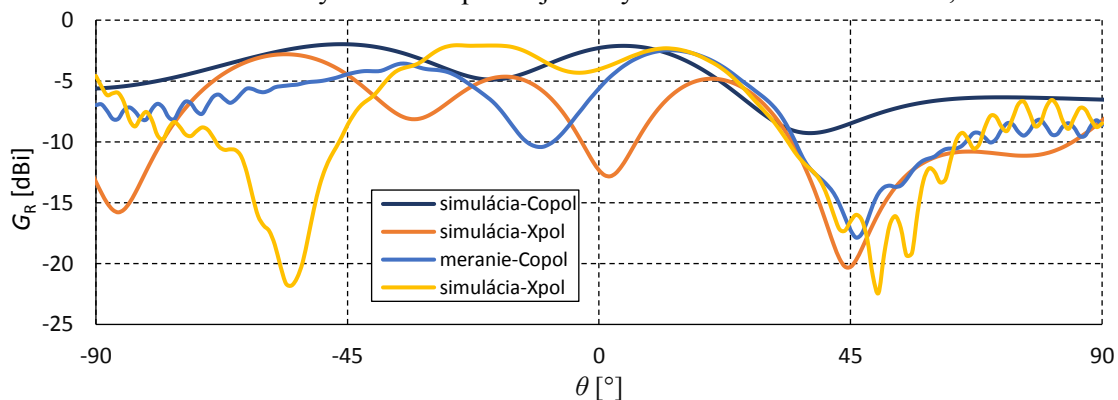
Obrázok 3.4 Meraný zisk monopólovej antény v rovine E na frekvencii 2,45 GHz.



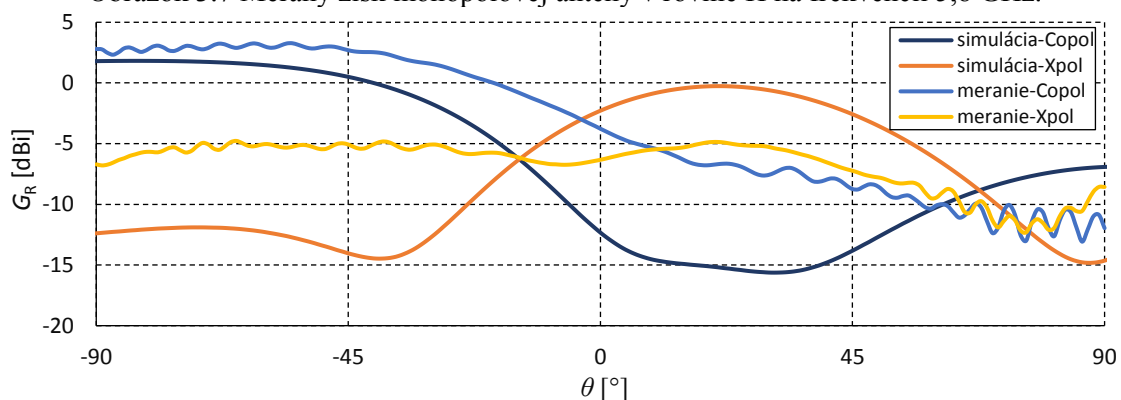
Obrázok 3.5 Meraný zisk monopólovej antény v rovine H na frekvencii 2,45 GHz.



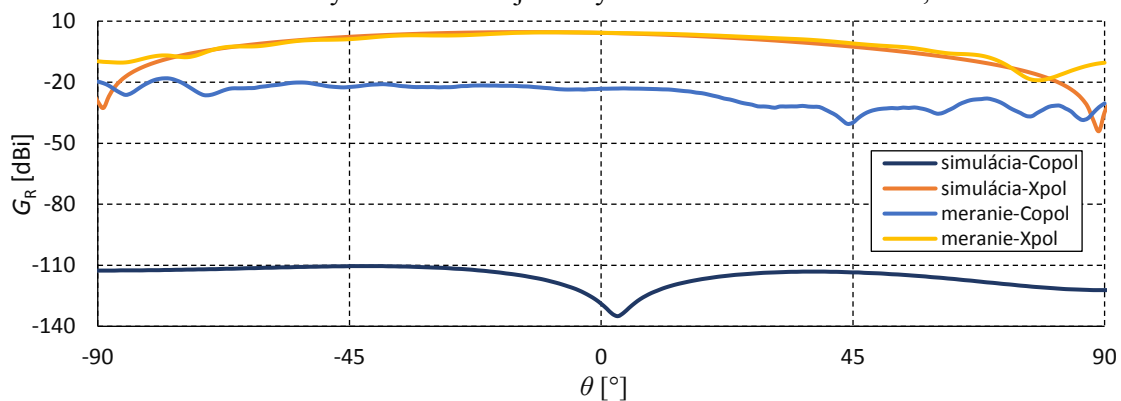
Obrázok 3.6 Meraný zisk monopólovej antény v rovine E na frekvencii 5,8 GHz.



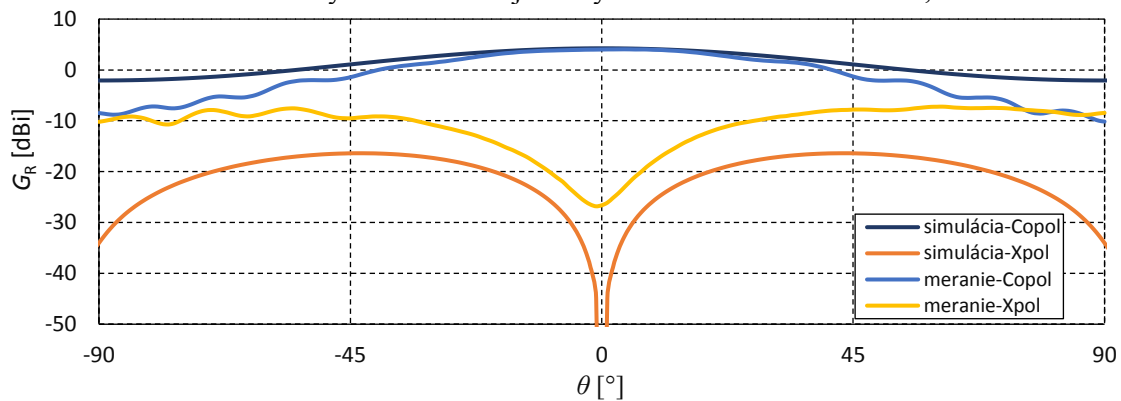
Obrázok 3.7 Meraný zisk monopólovej antény v rovine H na frekvencii 5,8 GHz.



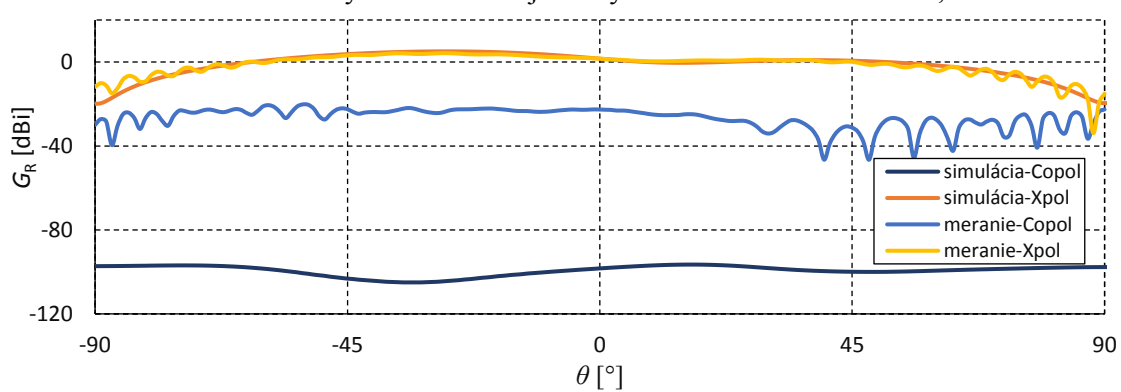
Obrázok 3.8 Meraný zisk štrbinovej antény v rovine E na frekvencii 2,45 GHz.



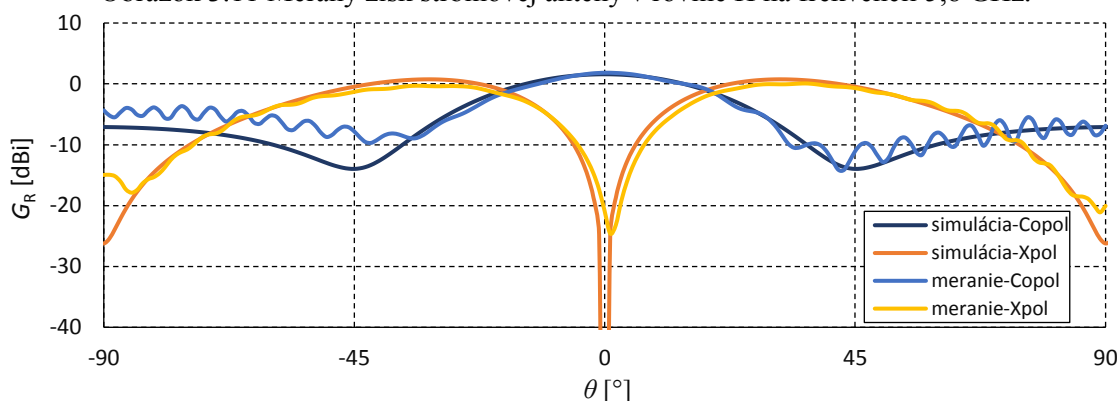
Obrázok 3.9 Meraný zisk štrbinovej antény v rovine H na frekvencii 2,45 GHz.



Obrázok 3.10 Meraný zisk štrbinovej antény v rovine E na frekvencii 5,8 GHz.



Obrázok 3.11 Meraný zisk štrbinovej antény v rovine H na frekvencii 5,8 GHz.



3.4 Meranie úrovne signálu antén vnútri auta

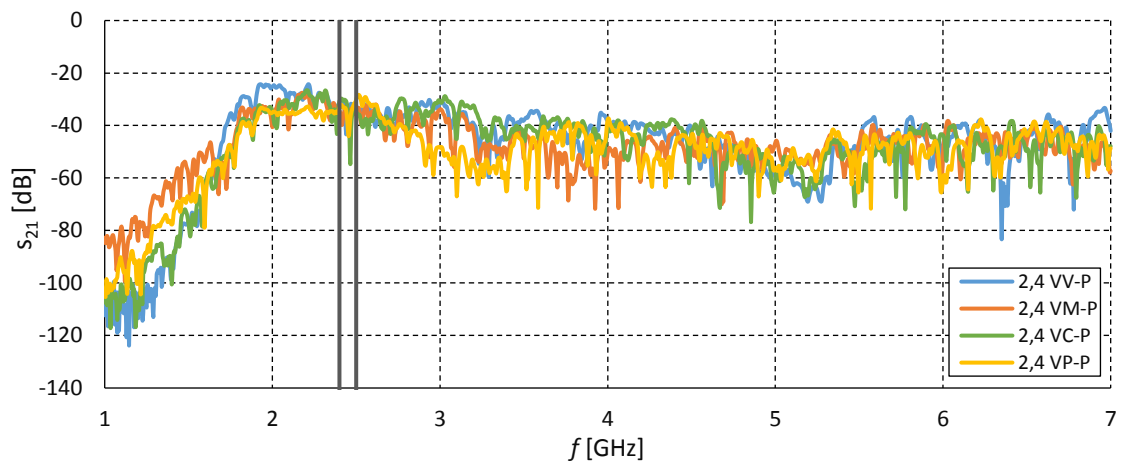
Meranie úrovne signálu navrhnutých a vyrobených antén bolo uskutočnené v aute v podzemnej garáži fakulty elektrotechniky VUT v Brne. Ako referenčné antény boli použité: obdĺžnikový vlnovod pracujúci na 2,4 GHz, obdĺžnikový vlnovod pracujúci na 5,8 GHz a jednopásmový mikropásmový fliačik pracujúci na 2,4 GHz, ktoré boli navrhnuté doktorandami ústavu UREL. Zmerané priebehy impedačného prispôsobenia týchto antén sú uvedené v prílohe C (C.1- C.3).

Postup merania bol nasledovný: vlnovodová anténa (pripojená na port 2 vektorového analyzátoru) bola umiestnená vždy vpredu na palubnej doske, meraná anténa (pripojená na port 1) sa pripevnila raz na predné a raz na zadné sedadlo v aute (približne do stredu operadla), a zakaždým sa pomocou vektorového analyzátoru zmeral výkonový prenos S_{21} medzi týmito anténami. Na spodnom pásme ISM 2,4 GHz v každej konfigurácii (na prednom aj zadnom sedadle) boli zmerané vždy štyri antény: vlnovodová, monopólová, štrbinová a fliačiková anténa. Na hornom pásme ISM 5,8 GHz boli v každej konfigurácii zmerané len tri antény: vlnovodová, monopólová a štrbinová anténa.

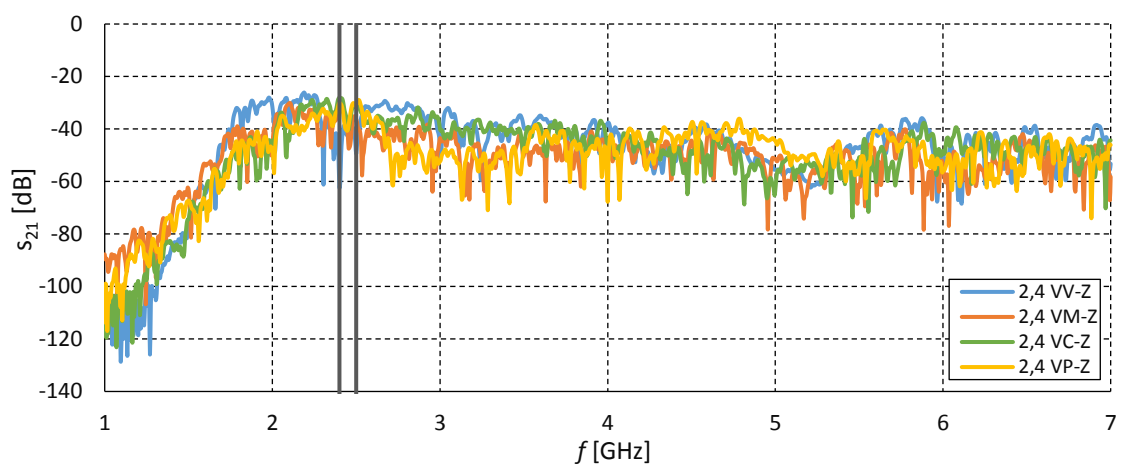
Na obr.3.12 až 3.15 sú zobrazené výkonové prenosy medzi meranými anténami a vlnovodovou anténou v závislosti na umiestnení a meranom pásme antén. V grafoch sú čiarami vyznačené krajné frekvencie pásiem ISM 2,4 a ISM 5,8 GHz. Označenie antén v legende nameraných priebehov je nasledujúce: V- vlnovodová anténa, M- monopólová anténa, C- štrbinová anténa, P- fliačiková anténa (patch). Označovanie priebehov je podľa tab. 3.2.

Tabuľka 3.2 Legenda k označovaniu priebehov v grafoch na obr. 3.12 až 3.17.

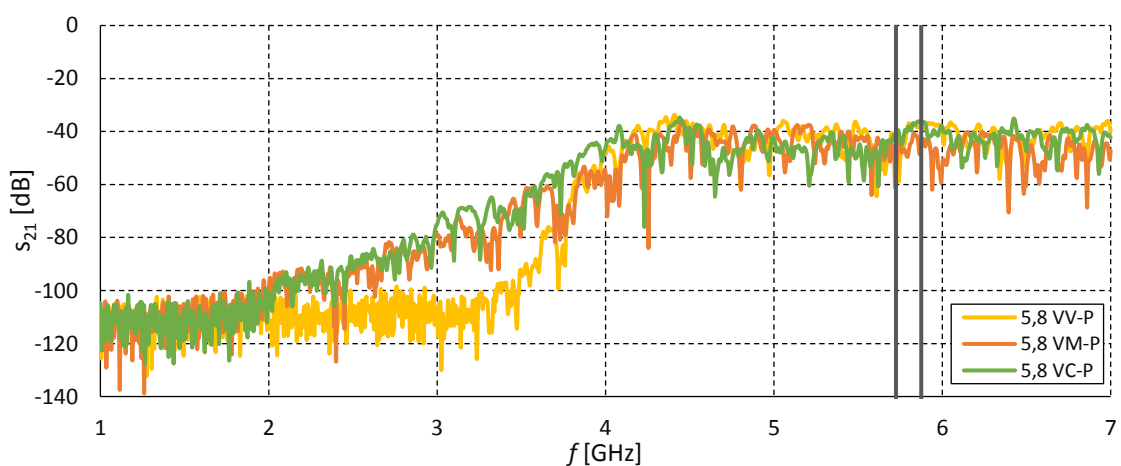
Merané frekvenčné pásmo	Výkonový prenos	Sedadlo
	VV -vlnovod -> vlnovod	
2,4	VV -vlnovod -> monopól. a.	P- predné
5,8	VC -vlnovod-> štrbinová a.	Z- zadné
	VP -vlnovod -> fliačiková. a.	



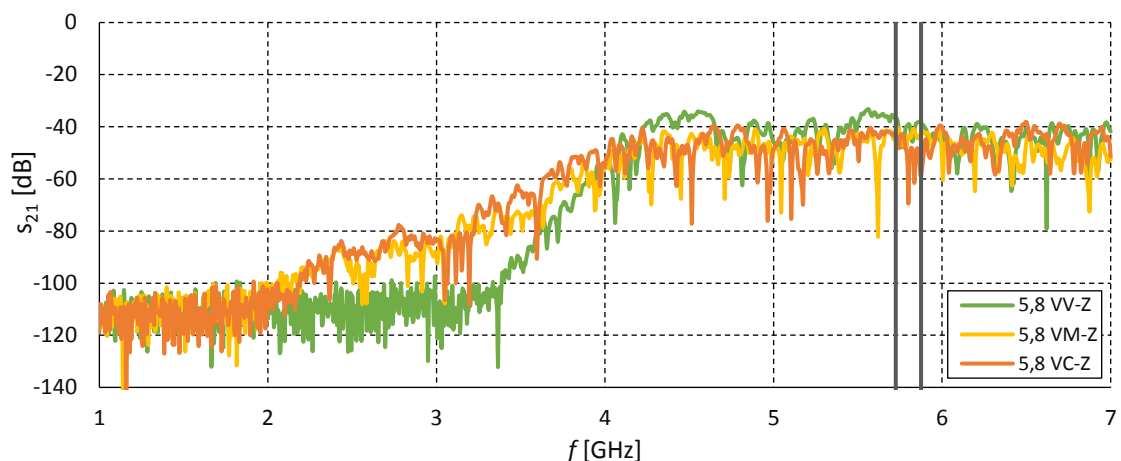
Obrázok 3.12 Výkonový prenos medzi anténami vnútri auta na vyznačenom pásme ISM 2,4 GHz pri umiestnení meraných antén na predné sedadlo.



Obrázok 3.13 Výkonový prenos medzi anténami vnútri auta na vyznačenom pásme ISM 2,4 GHz pri umiestnení meraných antén na zadné sedadlo.

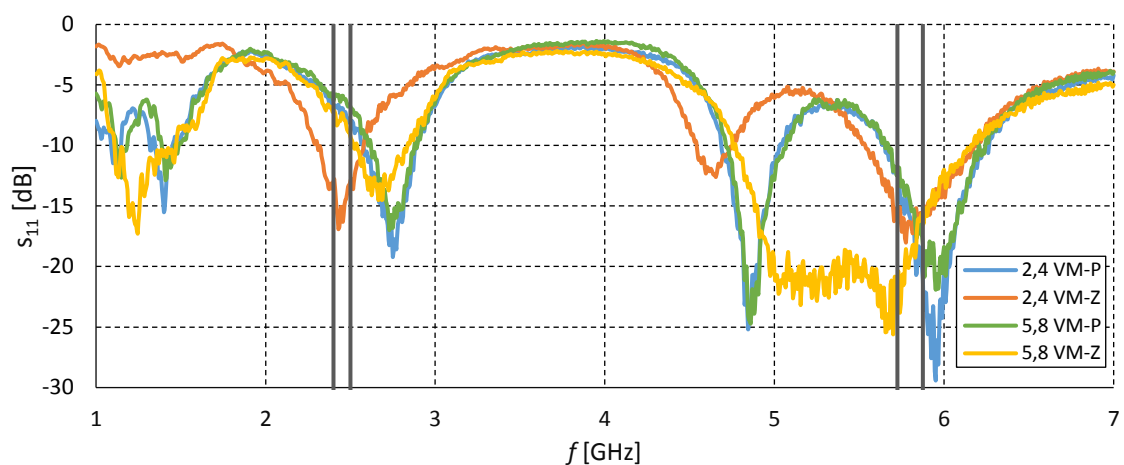


Obrázok 3.14 Výkonový prenos medzi anténami vnútri auta na vyznačenom pásme ISM 5,8 GHz pri umiestnení meraných antén na predné sedadlo.

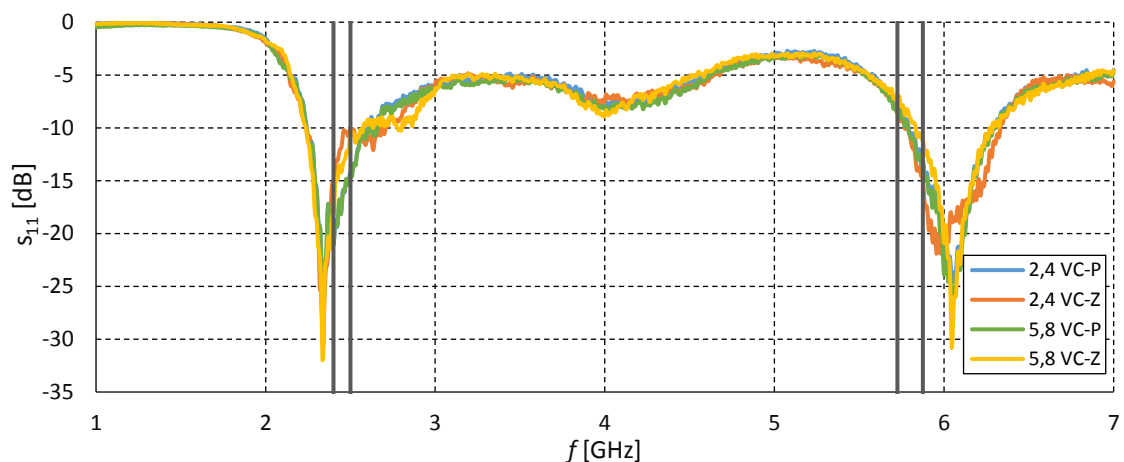


Obrázok 3.15 Výkonový prenos medzi anténami vnútri auta na vyznačenom pásme ISM 5,8 GHz pri umiestnení meraných antén na zadné sedadlo.

Na obr. 3.16 a 3.17 je zobrazené impedančné prispôsobenie monopólovej a štrbinovej antény počas jednotlivých meraní, pri pripevnení týchto antén na sedadlo auta.



Obrázok 3.16 Impedančné prispôsobenie monopólovej antény počas jednotlivých meraní v aute.



Obrázok 3.17 Impedančné prispôsobenie štrbinovej antény počas jednotlivých meraní v aute.

Z obr. 3.16 a 3.17 je zrejmé, že monopólová anténa sa v porovnaní so štrbinovou anténou viac rozladuje (mení sa jej impedančné prispôsobenie), keď je umiestnená v blízkosti sedadla.

V nameraných priebehoch výkonového prenosu medzi anténami nie je pozorovaný podstatný rozdiel medzi prenosom vlnovod- monopólová/štrbinová anténa a ostatnými priebehmi v jednotlivých grafoch. Problémom celého merania je to, že použité vlnovodové antény nie sú dobre prispôsobené na požadovaných pásmach (pozri obr. C.1- C.2). Pri použití lepších referenčných antén by sa v priebehu prenosu vlnovod- monopólová/štrbinová anténa očakávala na danom pásme vyššia úroveň výkonu oproti úrovni výkonu na ostatných frekvenciách v okolí daného pásma.

Z porovnania priebehov prenosu z hľadiska umiestnenia antény v aute (na predné alebo zadné sedadlo) nie je vidieť žiaden rozdiel úrovne výkonu. Pri porovnaní priebehov prenosu z hľadiska meraného pásma možno pozorovať vyššiu úroveň výkonu na nižšom pásme (max. -25 dB) oproti vyššiemu pásmu (maximálna úroveň -35 dB).

4 ZÁVER

Cieľom tejto práce bolo navrhnuť planárnu anténu vhodnú pre integráciu do interiéru auta pracujúcu v ISM pásmach 2,4 a 5,8 GHz. Na základe dvoch návrhov planárnych dvojpásmových antén na FR4 boli navrhnuté dve dvojpásmové antény na 3D textile pomocou programu CST Microwave Studio. Vzhľadom na veľmi nízku hodnotu permitivity 3D textilu sa nepodarilo napájacie mikropásikové vedenie antén prispôbiť na impedanciu 50 Ω - koplanárne vedenie navrhnutej štrbinovej antény má impedanciu približne 95 Ω asymetrické mikropásikové vedenie navrhnutej monopólovej antény má impedanciu cca 110 Ω . V dôsledku neprispôsobenia impedancie napájacieho vedenia bolo obtiažnejšie antény naladiť na požadované pásma. Tiež optimalizácia rozmerov antén musela byť robená spolu s pripojeným modelom SMA konektoru.

Motívy antén boli vyhotovené na samolepiacu medenú fóliu, ktorá bola nalepená na 3D textil. Touto metódou bol úspešne realizovaný prototyp dvojpásmovej monopólovej antény. U prototypu štrbinovej antény vplyvom nepresností pri prenášaní motívu antény na 3D textil nastalo rozladenie jej rezonancií. Presnejšia výroba antén by sa dala dosiahnuť technológiou sieťotlače.

Meranie smerových charakteristík vyrobených antén v bezodrazovej komore prinieslo výsledky porovnateľné, v dobrej zhode s výsledkami so simuláciami. Vyžarovací diagram navrhnutej monopólovej antény je dosť nerovnomerný, krížová zložka polarizácie vo viacerých smeroch presahuje úroveň súhlasnej zložky. Vyžarovací diagram navrhnutej štrbinovej antény je symetrický a smerový podľa symetrie jej štruktúry, tiež často prevažuje krížová zložka polarizácie nad jej súhlasnou zložkou (napr. v E rovine antény vo všetkých smeroch). Štrbinová anténa dosahuje väčší zisk (max. 4,54 dBi) oproti monopólovej anténe (max. 3,27 dBi).

Na záver prebehlo meranie úrovne signálu navrhnutých antén vnútri auta. Navrhnuté antény boli umiestňované na sedadlá a merané vlnovodovou anténou umiestnenou na palubnej doske auta. Použité ožarovacie antény k meraniu neboli bohužiaľ dobre prispôbolené na potrebných pásmach frekvencií. Kvôli nedostatku času sa tiež nepodarilo pre meranie zabezpečiť komerčne dostupné antény. Počas merania sa ukázalo, že monopólová anténa sa na rozdiel od štrbinovej antény rozladuje pri umiestnení v tesnej blízkosti sedadla. Preto sa štrbinová anténa javí vhodnejšia pre aplikáciu vnútri auta. Vhodné umiestnenie navrhnutých antén v aute by mohlo byť napr. zozadu hornej časti chrbtového operadla predného sedadla.

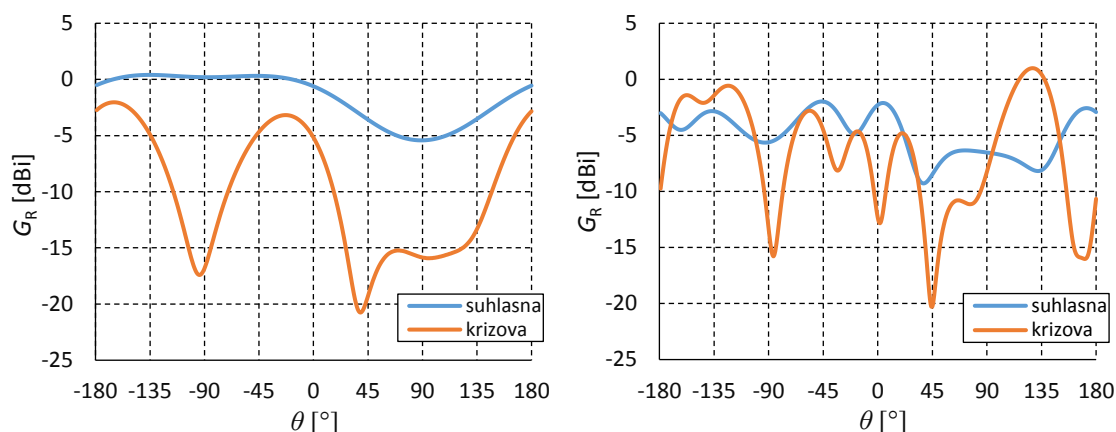
LITERATÚRA

- [1] MIKULÁŠEK, T. *Dvoupásmová anténa pro Globální navigační satelitní systém*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 64 s. Diplomová práce. Vedoucí diplomové práce: Ing. Jaroslav Láčík, Ph.D.
- [2] WATERHOUSE, Rodney B. *Microstrip Patch Antennas: A Designer's Guide*. New York: Springer Science+Business Media, 2003. ISBN 978-1-4419-5338-4 Fundamental Properties of Single Layer Microstrip Patch Antennas, p. 21-65.
- [3] RAIDA, Z., et al. *Multimediální učebnice elektromagnetických vln a mikrovlnné techniky* [online]. Brno: Vysoké učení technické, 2010 [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/>
- [4] HUBREGT, J. Visser. *Approximate antenna analysis for CAD*. Chichester: John Wiley & Sons, 2009, xvi, 304 s. ISBN 978-0-470-51293-7.
- [5] POZAR, David M. *Microwave Engineering*. 4th ed. Hoboken: JohnWiley & Sons, 2012, xvii, 736 s. ISBN 978-0-470-63155-3.
- [6] GARG R., et al. *Microstrip Antenna Design Handbook*. Norwood: Artech House, 2001, xvii, 845 s. ISBN: 0-89006-513-6.
- [7] PANDA, J. R., KSHETRIMAYUM, R. S. A Printed 2.4 GHz/5.8 GHz Dual-band Monopole Antenna with a Protruding Stub in the Ground Plane for WLAN and RFID Applications. *Progress In Electromagnetics Research*. 2011, Vol. 117, 425-434. DOI: 10.2528/PIER11051301
- [8] CHANG, T.-N., SHEN, G.-Y., LIN, J.-M. CPW-fed Antenna Covering Wimax 2.5/3.5/5.7 GHz Bands. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2010, Vol. 24, 189-197. DOI: 10.1163/156939310790735589.
- [9] CST MICROWAVE STUDIO *Workflow & Solver Overview*, c 2015-2016. [cit. 2016- 12- 02]. Dostupné ako súčasť programu CST STUDIO SUITE 2016.
- [10] Tyco Electronics, SMA Connectors - RF Coax Connectors Catalog, 1307191 katalóg, marec 2007 [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: http://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=src_hrtv&DocNm=1307191_SMA_Connectors&DocType=CS&DocLang=English&DocFilename=ENG_CS_1307191_SMA_Connectors_0307.pdf
- [11] KADĚRA, P. *Demonstrační zařízení pro sklizení energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. 68 s., 4 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Michal Mrnka.

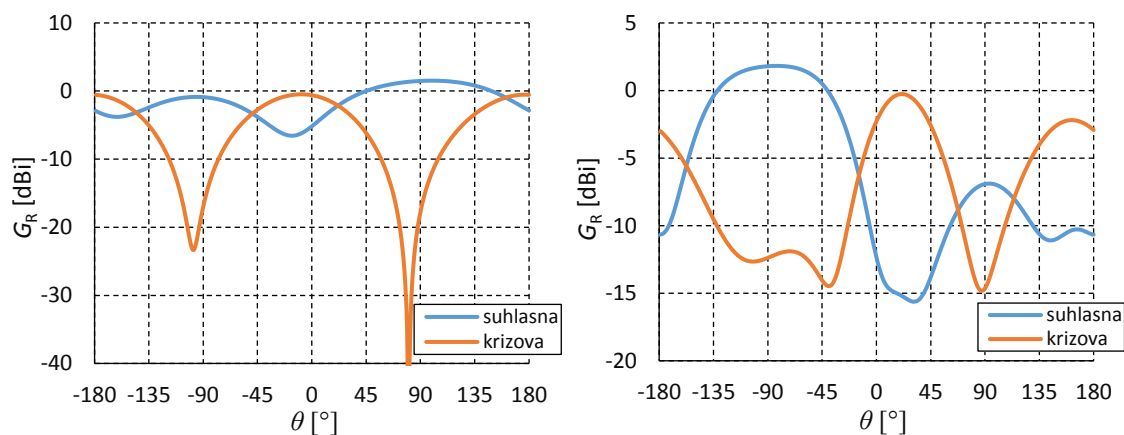
ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN, SKRATIEK

WLAN	Wireless Local Area Network, bezdrôtová lokálna sieť
ISM	Industrial Scientific Medical, bezlicenčné frekvenčné pásmo pre priemyselné, vedecké a medicínske účely
GSM	Global System for Mobile Communications, Globálny systém mobilných komunikácií
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System, Univerzálny systém mobilných telekomunikácií
MoM	Method of Moments, mometová metóda analýzy
FDTD	Finite Difference Time Domain, metóda konečných diferencií v časovej oblasti
FEM	Finite Element Method, metóda konečných prvkov
λ	vlnová dĺžka
ϵ_r	relatívna permitivita prostredia
Z_{vst}	vstupná impedancia antény
R_{str}	stratový odpor antény
R_Σ	odpor žiarenia antény
X_Σ	reaktancia žiarenia antény
D	činiteľ smerovosti antény
η	účinnosť antény
G	zisk antény
$\tan \delta$	stratový činiteľ dielektrického materiálu
E	intenzita elektrického poľa
H	intenzita magnetického poľa
f_0	pracovná frekvencia antény
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access, bezdrôtový komunikačný štandard
CST MWS	Computer Simulation Technology Microwave Studio, simulačný program
ϵ	absolútna permitivita
μ	absolútna permeabilita
PEC	Perfect Electric Conductor, dokonalý elektrický vodič
SMA	SubMiniature version A, označenie typu koaxiálneho konektora

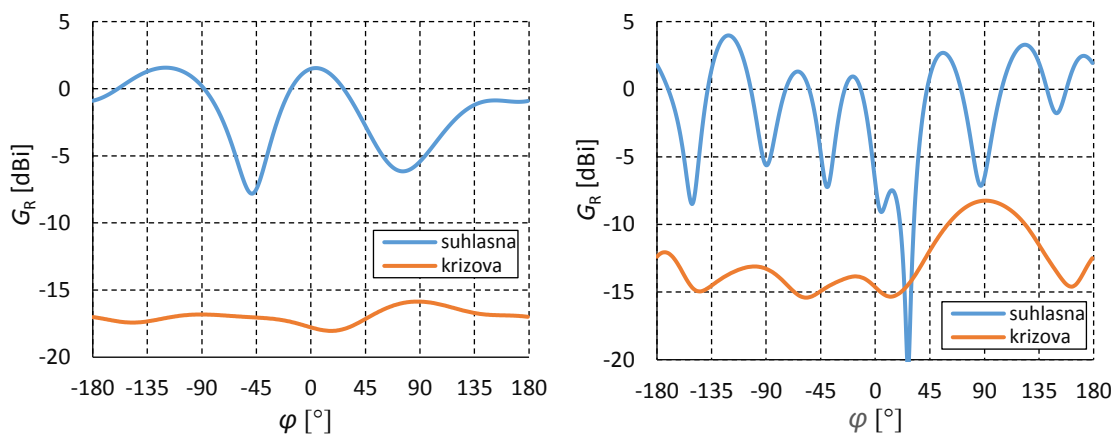
A SIMULOVANÉ SMEROVÉ CHARAKTERISTIKY



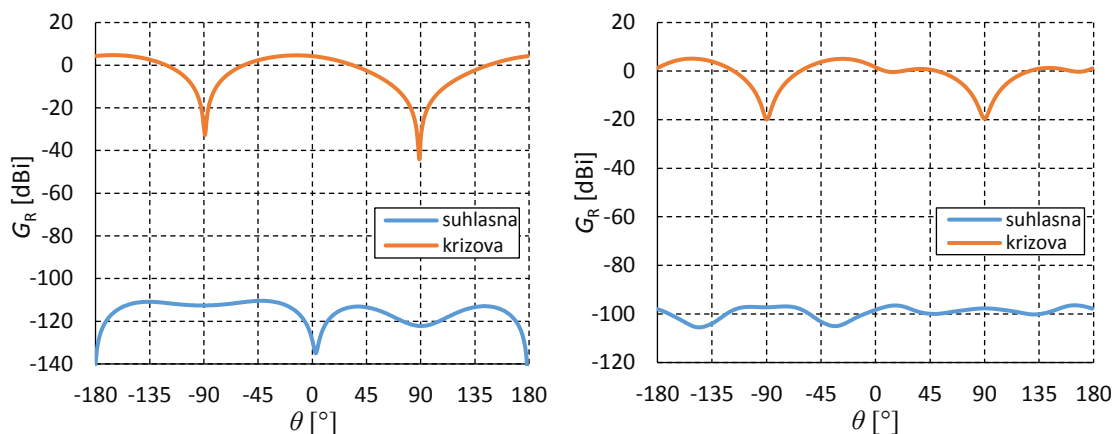
Obrázok A.1 Simulované smerové charakteristiky monopólovej dvojpásmovej antény na frekvencii 2,45 GHz (vpravo) a 5,8 GHz (vľavo) v rovine E.



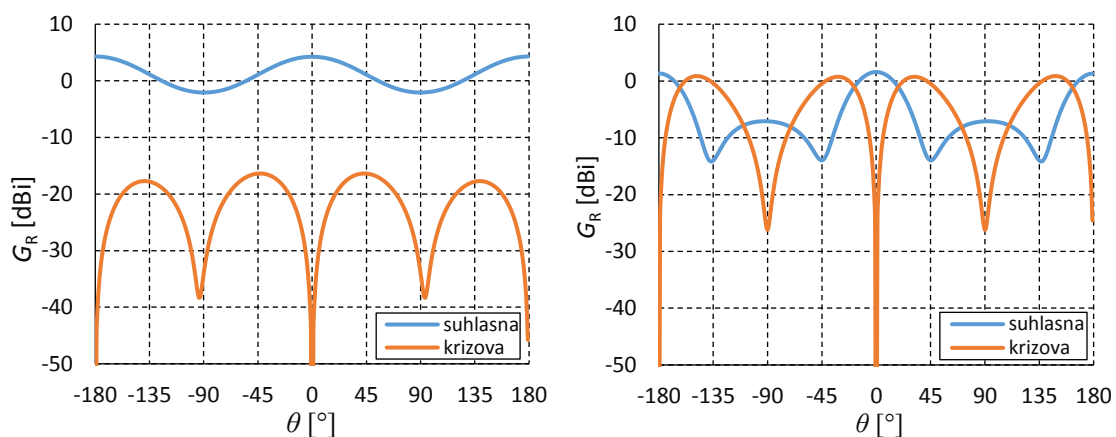
Obrázok A.2 Simulované smerové charakteristiky monopólovej dvojpásmovej antény na frekvencii 2,45 GHz (vpravo) a 5,8 GHz (vľavo) v rovine H.



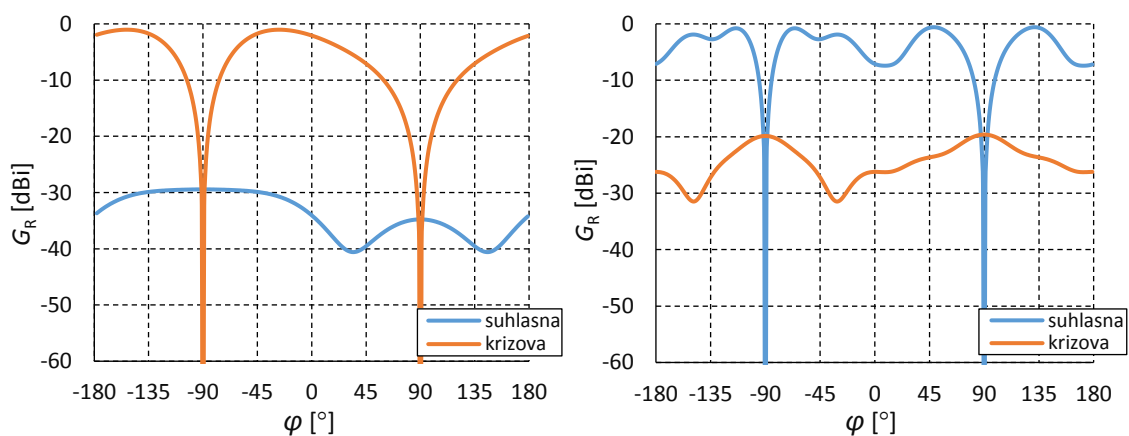
Obrázok A.3 Simulované smerové charakteristiky monopólovej dvojpásmovej antény na frekvencii 2,45 GHz (vpravo) a 5,8 GHz (vľavo) v xy -rovine antény.



Obrázok A.4 Simulované smerové charakteristiky štrbinovej dvojpásmovej antény na frekvencii 2,45 GHz (vpravo) a 5,8 GHz (vľavo) v rovine E.

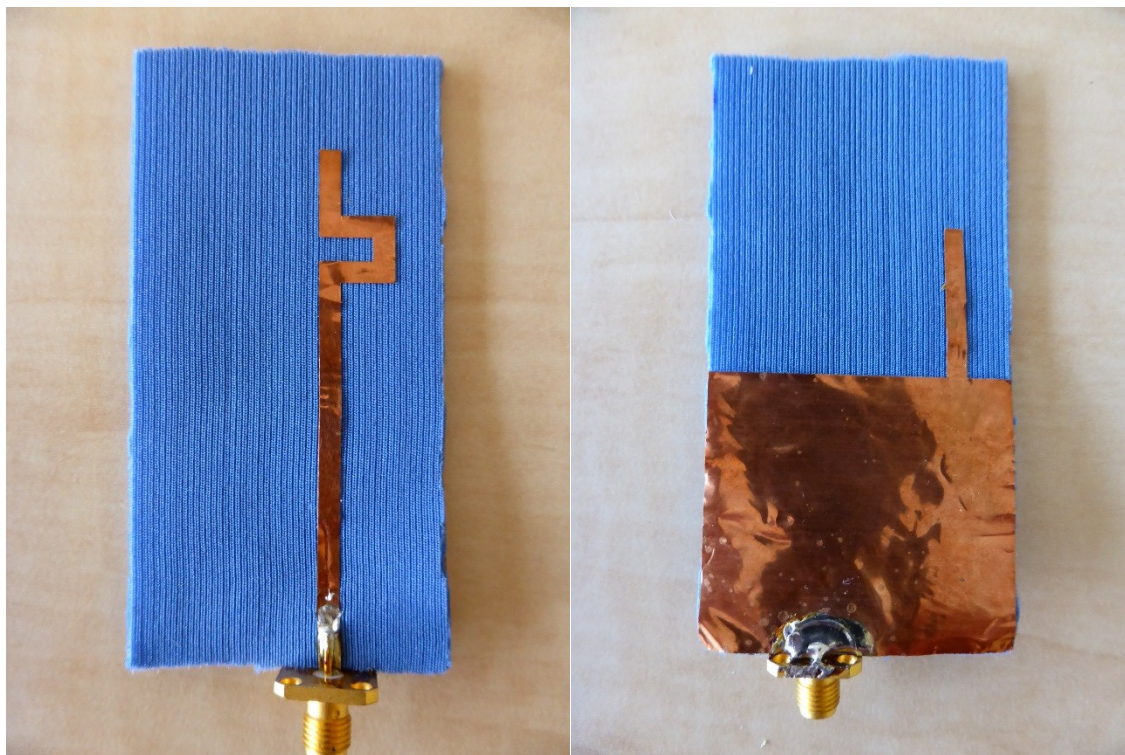


Obrázok A.5 Simulované smerové charakteristiky štrbinovej dvojpásmovej antény na frekvencii 2,45 GHz (vpravo) a 5,8 GHz (vľavo) v rovine H.

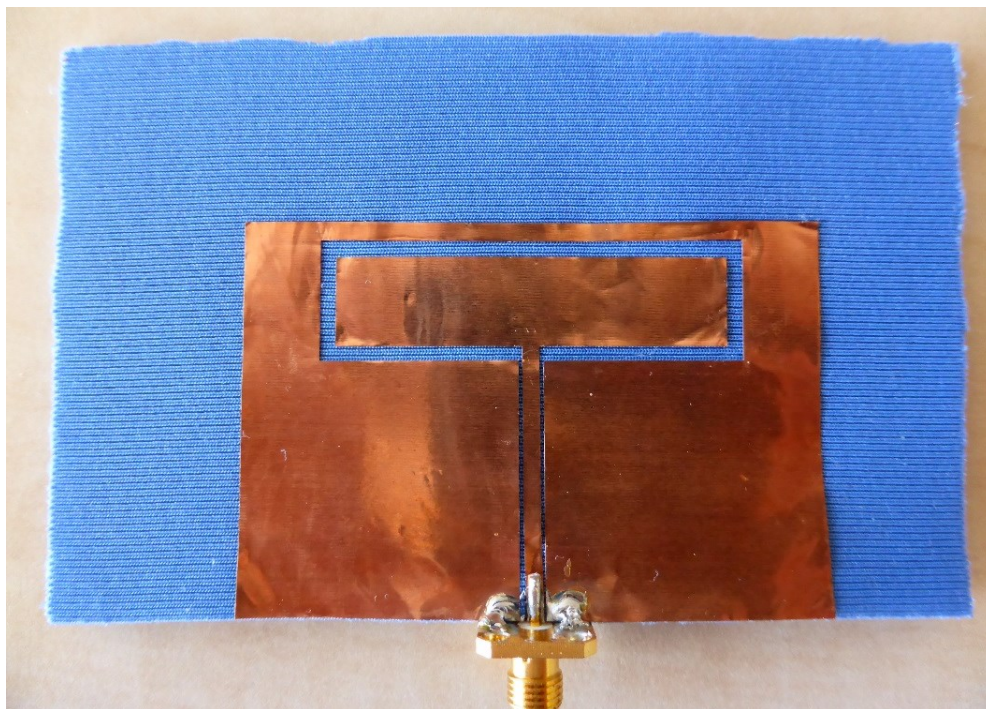


Obrázok A.6 Simulované smerové charakteristiky štrbinovej dvojpásmovej antény na frekvencii 2,45 GHz (vpravo) a 5,8 GHz (vľavo) v xy-rovine antény.

B FOTOGRAFIA VYROBENÝCH ANTÉN

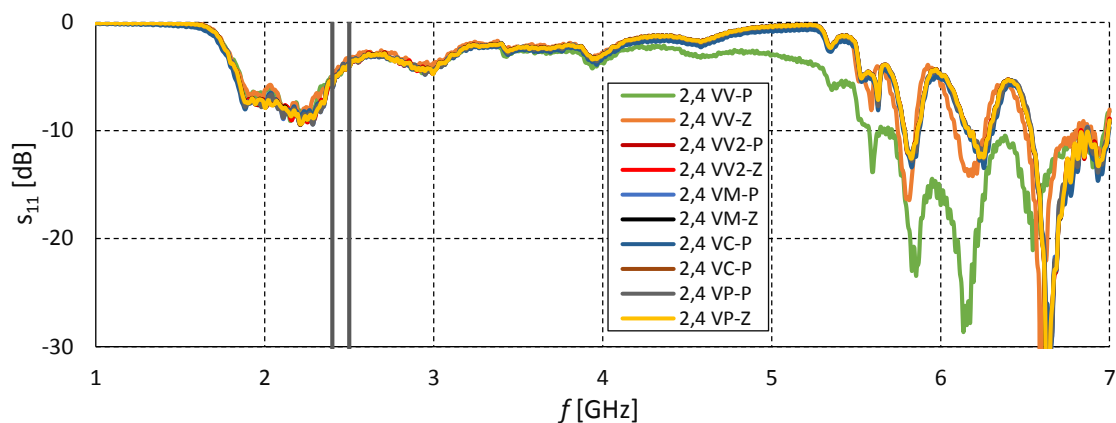


Obrázok B.1 Dvojpásmová monopólová anténa, horná strana a spodná strana (zľava).

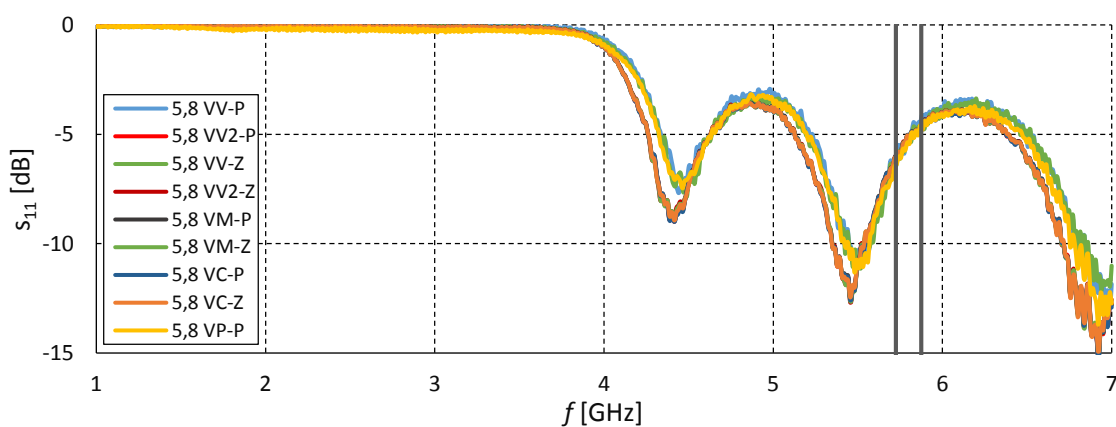


Obrázok B.2 Dvojpásmová štrbinová anténa.

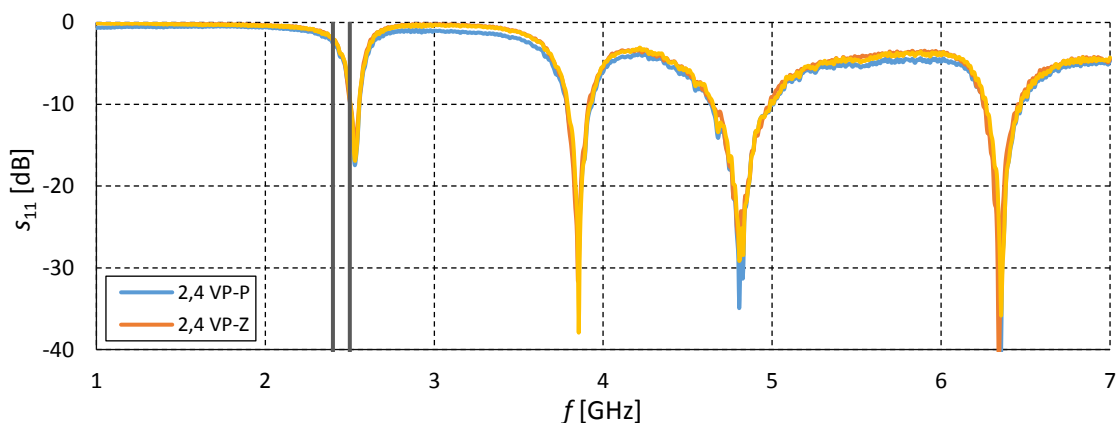
C IMPEDANČNÉ PRISPÔSOBENIE REFERENČNÝCH ANTÉN POUŽITÝCH K MERANIU V AUTE



Obrázok C.1 Impedančné prispôsobenie vlnovodovej antény- obdĺžnikový vlnovod na 2,4 GHz.



Obrázok C.2 Impedančné prispôsobenie vlnovodovej antény- obdĺžnikový vlnovod na 5,8 GHz.



Obrázok C.3 Impedančné prispôsobenie mikropásikovej antény- pravouhlý fliačik na 2,4 GHz.